

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM  
HOLOGRAFIA ELETRÔNICA**

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

**MARCOS ROBERTO RODACOSKI**

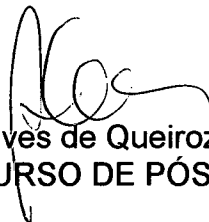
FLORIANÓPOLIS  
SANTA CATARINA - BRASIL  
OUTUBRO DE 1997

# MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

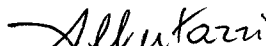
MARCOS ROBERTO RODACOSKI

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA”

Especialidade ENGENHARIA MECÂNICA - Área de Concentração METROLOGIA E  
INSTRUMENTAÇÃO e aprovada em sua forma final pelo CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

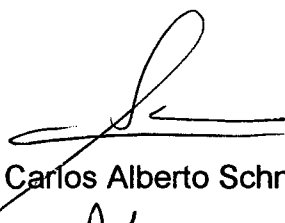


Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.  
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr.Eng.  
ORIENTADOR

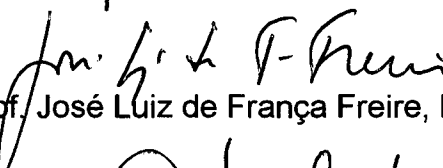
BANCA EXAMINADORA:



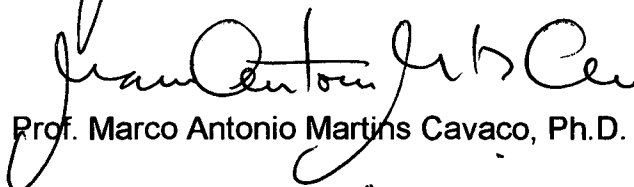
Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr.Ing.



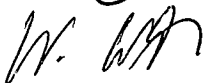
Prof. Henner Alberto Gomide, Ph.D.



Prof. José Luiz de França Freire, Ph.D.



Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, D. Ing.



Ao meu País

À Giseli, minha Esposa

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., pela orientação, dedicação e paciência;
- À minha esposa, pela alegria e otimismo, e por ter feito nossos os meus ideais;
- Aos meus pais, por toda a educação que me possibilitaram ter;
- Aos meus amigos, que participaram na minha vida e no meu trabalho neste período;
- Aos Profs. Walter Lindolfo Weingaertner e Álvaro Toubes Prata, pelo apoio recebido;
- Aos colegas mestrando Juliano Boettger e César Kanda pelo trabalho em equipe e amizade;
- Aos acadêmicos da UFSC e do grupo PET que ajudaram no desenvolvimento do trabalho, em especial: Alexandre Barp, Claudionor M. Jr., Demétrius R. Lima, Eduardo Kubo, Gilberto Fertig, Horácio P. Amarilho, Roberto G. Gomes e Benno Paust.
- Aos técnicos da Fundação CERTI: Danilo José dos Santos e Detlef Brall, pela ajuda na montagem e confecção de dispositivos da parte experimental;
- Aos colaboradores da Fundação CERTI, pela amizade e apoio no trabalho.
- Ao CEFET-PR e a COPEL, pela oportunidade e apoio na realização de curso de pós graduação;
- À UFSC e ao CERTI, pela disposição de sua infra-estrutura;
- Ao povo brasileiro, pelo apoio financeiro fornecido por intermédio do governo;

## SUMÁRIO

Simbologia .....	ix
Biografia.....	x
Resumo.....	xii
Abstract .....	xiii
1. Introdução .....	1
2. Tensões Residuais.....	5
2.1. Tipos de Tensões Residuais .....	5
2.1.1 Tensões Macroscópicas .....	5
2.1.2 Tensões Microscópicas.....	6
2.1.3 Tensões Sub-Microscópicas .....	7
2.2. Mecanismos de Geração das Tensões Residuais.....	7
2.3. Efeitos das Tensões Residuais .....	9
3. Métodos de Medição de Tensões Residuais.....	11
3.1. Difração de Raios-X.....	18
3.2. Difração de Raios Neutrons .....	20
3.3. O Método Barkhausen.....	21
3.4. Ultra-som .....	22
3.5. Método de Remoção de Camadas.....	22
3.6. Alívio Mecânico por Seccionamento.....	25
3.7. Método da Propagação de Trinca.....	26
3.8. Identação.....	27
4. Método do Furo.....	28
4.1. Histórico .....	28
4.2. Princípios .....	30
4.3. Modelamento Matemático .....	31
4.3.1. Formulação Matemática do Furo Passante .....	31
4.3.2. Formulação Matemática do Furo Cego.....	36
4.4. Considerações Práticas .....	38
4.5. Fontes de Erros .....	40

	vi
4.6. Método do Furo com Extensômetros.....	42
4.6.1. Formulação Analítica.....	44
4.6.2. Fontes de Erros e Limitações com Extensômetros .....	47
4.7. Método do Furo Aplicado com Técnicas Ópticas .....	49
4.7.1. Fotoelasticidade .....	49
4.7.2. Interferometria Moiré.....	50
4.7.3. Holografia Interferométrica .....	51
4.7.4. Holografia Eletrônica - HE -.....	52
4.7.5. Holografia Shearing Eletrônica - ESSPI - .....	53
5. Processo de Execução do Furo .....	54
5.1. Características Ideais do Furo .....	54
5.2. Técnicas de Furação .....	55
5.2.1. Usinagem por Jato Abrasivo .....	56
5.2.2. Usinagem Eletroquímica - ECM - .....	57
5.2.3. Usinagem Convencional.....	57
5.3. Obtenção de Furos por Usinagem.....	60
5.3.1. Ferramentas Utilizadas na Usinagem .....	62
5.3.2. Mecanismo de Usinagem com Turbinas Pneumáticas de Altíssima Rotação.....	62
5.3.3. Origem das Tensões Introduzidas Pelo Processo de Furação .....	64
5.3.4. Montante de Tensões Residuais Introduzidas na Usinagem .....	65
5.4. Metodologia de Avaliação das Técnicas de Obtenção de Furos .....	66
5.4.1. Obtenção E Caracterização das Amostras .....	66
5.4.2. Furação.....	67
5.4.3. Análise dos Furos.....	71
5.5. Condições Finais dos Furos .....	72
5.5.1. Diâmetro .....	73
5.5.2. Circularidade.....	74
5.5.3. Cilindricidade.....	75
5.5.4. Profundidade .....	75
5.5.5. Fundo Plano .....	76
5.5.6. Ortogonalidade.....	76

	vii
5.5.7. Qualidade da Parede do Furo.....	77
5.5.8. Extensão da Zona Deformada Plasticamente.....	78
5.5.9. Presença de Rebarbas.....	80
6. Metodologia de Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica.....	82
6.1. Princípios da Holografia Eletrônica.....	82
6.1.1. Interferometria Speckle.....	83
6.1.2. Mapas de Franjas .....	86
6.1.3. Cálculo dos Deslocamentos Através das Ordens de Franjas .....	87
6.1.4. Mapas de Fases .....	87
6.2. Interferômetro Radial .....	89
6.2.1. Bancada Experimental .....	90
6.2.2. Sinal de Medição .....	90
6.2.3. Tratamento das Imagens .....	91
6.2.4. Amostragem do Sinal - Algoritmo do Mínimo Gradiente de Fase.....	91
6.2.5. Erros Devido a Descentragem .....	93
6.2.6. Correção da Centragem .....	94
6.3. Quantificação das Tensões Residuais .....	95
6.3.1. Algoritmo dos Mínimos Quadrados .....	96
6.3.2. Algoritmo dos Harmônicos .....	96
6.3.3. Algoritmo para Compensação do Nível de Fundo.....	97
6.3.4. Correções para Furo Cego por Elementos Finitos .....	99
6.4. Fluxograma do Ensaio.....	101
7. Simulação Experimental de Campos de Tensões Residuais.....	102
7.1. Justificativa da Escolha do Tipo de Carregamento .....	102
7.2. Dispositivo de Carregamento de Tração Uniaxial.....	103
7.3. Corpos de Prova .....	106
7.4. Experimentos Controlados de Medição de Tensões Uniaxiais .....	107
7.4.1. Bancada Experimental de Medição do Campo de Tensões Relativo ao Carregamento Mecânico .....	107
7.4.2. Bancada Experimental da Holografia Eletrônica .....	108

	viii
7.5 Fontes de Erros nas Medições Experimentais .....	112
8. Análise dos Resultados .....	114
8.1. Valor de Referência .....	114
8.1.1. Extensometria .....	115
8.1.2. Carregamento não Uniforme dos Corpos de Prova .....	116
8.1.3. Fatores Ambientais .....	117
8.1.4. Tensões Residuais Iniciais dos Corpos de Prova .....	117
8.1.5. Incerteza Combinada do Valor de Referência.....	118
8.2. Sistema de Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica e Método do Furo .....	120
8.3. Resultados Experimentos .....	123
8.3.1 Corpo de Prova de Aço 1045 - Carregamento 1 - Face 1 .....	124
8.3.2 Corpo de Prova de Aço 1045 - Carregamento 2 - Face 2 .....	127
8.3.3 Corpo de Prova de Aço 4140 - Carregamento 1 - Face 1 .....	130
8.3.4 Corpo de Prova de Aço 4140 - Carregamento 2 - Face 2 .....	133
8.3.5 Corpo de Prova de Alumínio 201 - Carregamento 1 - Face 1.....	136
8.3.6 Corpo de Prova de Alumínio 201 - Carregamento 2 - Face 2.....	139
8.4 Análise e Discussão dos Resultados .....	142
8.5 Considerações Complementares .....	145
9. Conclusões .....	147
10. Referências Bibliográficas .....	152
Anexos.....	167

## SIMBOLOGIA

SIMBOLO	SIGNIFICADO
1D, 2D, 3D	= abreviatura de uma dimensão, duas dimensões, 3 dimensões
ASTM	= abreviatura de “American Society for Testing of Materials”
BEM	= abreviatura de método de elementos de contorno
BNA	= método de Barkhausen
CCD	= abreviatura para “Charge Couple Device”
ECM	= abreviatura para “Electrical Chemical Machine”
EDM	= abreviatura para “Electrical Discharge Machine”
Emáx	= abreviatura para erro máximo
EQ	= abreviatura para erro quadrático
ER	= abreviatura de extensômetro de resistência
ESPI	= abreviatura para “Electronic Speckle Pattern Interferometry”
ESSPI	= abreviatura “Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry”
FEM	= abreviatura de método de elementos finitos
HE	= abreviatura de holografia eletrônica
IM	= abreviatura para incerteza de medição
MMQ	= abreviatura de método dos mínimos quadrados
n	= número de pontos
NiTi	= abreviatura para revestimento com nitreto de titânio
OF	= abreviatura para ordem de franja
P	= ponto considerado sobre a peça
Re	= abreviatura para repetitividade
SM	= abreviatura para sistema de medição
Td	= abreviatura para tendência
$U(\sigma_{HE})$	= abr. para incert. expand. para medição de tensões residuais com HE
$U(\sigma_{VR})$	= abr. para incerteza expandida das tensões de referência
$U(n)=U(\sigma_N)$	= abr. para incerteza expandida das tensões residuais normalizadas
VR	= abreviatura para valor de referência

SIMBOLO	DIMENSÃO	UNIDADE	SIGNIFICADO
$\varepsilon_R$	-	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	= deformação radial
$\varepsilon_\theta$	-	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	= deformação tangencial
$\gamma_{R\theta}$	-	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	= deformação cisalhante
$\varepsilon_z$	-	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	= deformação normal
$u_\theta$	[L]	[mm]	= deslocamento tangencial
$u_R$	[L]	[mm]	= deslocamento radial
w	[L]	[mm]	= deslocamento fora do plano
$\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}$	-	-	= coeficientes do método do furo obtidos por FEM
$\vec{d}$	[L]	[mm]	= vetor deslocamento
$\sigma_R$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensão radial
$\sigma_\theta$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensão tangencial
$\tau_{R\theta}$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensão cisalhante
$\theta$	[ângulo]	[graus]	= ângulo entre uma direção qualquer e a direção de $\sigma_1$
$\nu$	-	-	= coeficiente de Poisson
$\lambda$	[L]	[ $\mu\text{m}$ ]	= comprimento de onda da luz do laser
$\sigma_1, \sigma_2$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensões principais no plano
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e $\varepsilon_3$ ,	-	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	= deformações dos três ER da roseta
$\sigma_{1N}, \sigma_{2N}$	-	-	= tensões principais normalizadas
$\sigma_{HE}$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensões residuais medidas com holografia eletrônica
$\sigma_N$	-	-	= tensões residuais normalizadas
$\sigma_{VR}$	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= tensões dos valores de referência
a	[L]	[mm]	= raio do furo
A, B, C	-	-	= coeficientes do método do furo
D	[L]	[mm]	= diâmetro do furo
E	[ $\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$ ]	[MPa]	= módulo de elasticidade
h	[L]	[mm]	= profundidade do furo
r	[L]	[mm]	= raio qualquer
t	[L]	[mm]	= espessura



do Autor

Marcos Roberto Rodacoski nasceu em Curitiba - PR, no dia 12 de junho de 1966, filho de Alechandre Rodacoski e Nerci Joselita Arsie Rodacoski.

Estudou em Curitiba no Colégio Senhor Bom Jesus no período de 1973 a 1980, onde cursou regularmente o primeiro grau.

Em 1981 ingressou no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná -CEFET-PR, para o curso Técnico em Mecânica que concluiu já em 1983.

Paralelamente ao último ano do curso técnico, em 1983 ingressou na Universidade Federal do Paraná para o curso de Engenharia Mecânica. No período de 1984 e 1985 estagiou em três empresas, a primeira na área de pesquisas e ensaios mecânicos, a outra em manutenção e projetos e por último na área de desenvolvimento de novos produtos. Ainda em 1986 foi selecionado e ingressou como professor do curso técnico em mecânica no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - CEFET-PR. Obteve o título de engenheiro mecânico no final de 1987.

No ano de 1988 assumiu como gerente de um grupo de nacionalização e projetos de peças sobressalentes num convênio entre o CEFET-PR e a PETROBRÁS e ainda no mesmo ano realizou um estágio prático de 6 meses na área de Mecânica de Precisão e Física Técnica na Fachhochschule de Munique na Alemanha.

No início de 1990 foi selecionado e ingressou no curso de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC-. Desenvolveu trabalho orientado pelo Prof. Armando Albertazzi G. Jr. na área de holografia e medição de deformações em pistões devido a gradientes térmicos. Em 1993 foi aceito para o curso de Doutorado, também na UFSC no Laboratório de Metrologia e Automação ainda com enfoque em holografia eletrônica como ferramenta de medição de deslocamentos, deformações e tensões. No ano de 1994 foi efetivado como engenheiro pesquisador no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento - LAC convênio entre a Companhia Paranaense de Energia - COPEL e a Universidade Federal do Paraná - UFPR. No LAC tem atuado na área de medição de tensões residuais como seu principal projeto de pesquisa. Desde o ano de 1995 também tem atuado como docente no Curso de Engenharia Mecânica do CEFET-PR.

## RESUMO

Este trabalho envolve o desenvolvimento e avaliação metrológica de uma técnica alternativa para medição de tensões residuais partindo do método do furo. O sinal de medição, associado ao alívio das tensões na região vizinha ao furo, é obtido por holografia eletrônica (HE) através de uma nova concepção de interferômetro, capaz de medir apenas a componente radial do campo de deslocamentos.

O trabalho inicia com um estudo aprofundado sobre tensões residuais. Os diferentes tipos e origens de tensões residuais são apresentadas. Os princípios, peculiaridades, limitações, aspectos positivos e características metrológicas das diferentes técnicas tradicionalmente utilizadas para medição de tensões residuais são apresentadas. Especial ênfase é dedicada ao método do furo, cujas particularidades são analisadas em detalhes, inclusive aspectos ligados à produção de furos de pequenos diâmetros, adequados à esta técnica.

São desenvolvidos algoritmos específicos para tratamento dos mapas de franja típicos do interferômetro radial e quantificação de tensões residuais. Diferentes procedimentos são numérica e experimentalmente avaliados.

Um procedimento para validação da técnica desenvolvida é implementado. Tensões residuais são simuladas através de um dispositivo mecânico capaz de “congelar” um estado de tensões mecânicas uniaxial e conhecido (com certa incerteza) em um corpo de prova previamente recozido. As características do campo de tensões induzido e aspectos ligados à sua quantificação são analisados em detalhes.

Uma série de experimentos controlados é conduzida para avaliar experimentalmente o desempenho metrológico da nova técnica. Boa parte dos resultados indicam um desempenho comparável ao do método do furo com extensometria. Ganhos nos tempos envolvidos para realização dos ensaios são evidenciados.

## ABSTRACT

This work presents the development and metrological evaluation of an alternative residual stress measurement technique based on the hole drilling method. The measurement signal, related to the released stresses around the hole, is measured by electronic holography (HE) through a new conception of interferometer, capable to measure only the radial displacement component.

A deep study of residual stresses is presented at the beginning. The different kinds and sources of residual stresses are presented. The principles, particularities, limitations, advantages and metrological performance of residual stresses measuring techniques are also presented. The hole drilling method is analyzed in details. The drilling process of small holes is deeply investigated.

Special algorithms are developed to process the specific fringe patterns related to the radial interferometer and to quantify the residual stresses. Different approaches are numerically and experimentally evaluated.

An experimental procedure to validate the developed technique is implemented and evaluated. Residual stresses are mechanically simulated through a mechanical device capable to “freeze” the applied mechanical stress field on the surface of an annealed specimen. A reference value, its uncertainty and information about the stress field homogeneity are obtained for each loading through strain gauges.

A set of controlled tests are performed in order to experimentally evaluate the metrological performance of the developed technique. Most of the results show that the system’s performance is comparable to the conventional strain gauge based hole drilled method. The elapsed testing time seems to be considerably shorter for this new technique.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Tensões residuais são tensões internas em estado de equilíbrio que existem mesmo na ausência de carregamentos externos, gradientes de temperatura e de forças de massa  $[FL^{-2}]$  [1]. Surgem em qualquer componente devido ao processo de fabricação ou posterior beneficiamento e dificilmente podem ser previstas com exatidão, a menos que se conheça, com detalhes, toda a história da peça, desde a fabricação da matéria prima até o emprego final.

Sob o aspecto metrológico pode-se dizer que as tensões residuais - em estudo - são grandezas macroscópicas, estáticas, elásticas e cuja faixa de ocorrência varia desde zero até tensões cujo valor é o mesmo da tensão de escoamento do material. Estes campos de tensões residuais oriundos de boa parte dos processos de beneficiamento, podem ser trativos ou compressivos e em geral são triaxiais e variam de ponto para ponto, principalmente devido à complexidade das geometrias. Na prática as grandezas comumente medidas são as duas tensões principais que agem próximas à superfície da peça e sua direção principal. Existem ainda tensões residuais microscópicas e sub-microscópicas que no entanto não fazem parte do escopo deste trabalho.

O conhecimento do nível de tensões residuais, presente nas peças de aplicações na engenharia, tem envolvimento com a segurança, pois o campo de tensões residuais presente num componente influencia na performance do material sob diferentes condições de carregamento estático ou dinâmico. Existem casos descritos na literatura onde as tensões residuais tiveram grande participação em desastres e acidentes trágicos. O conhecimento do campo de tensões residuais, isto é, sua magnitude, orientação e distribuição, além de contribuir para o conhecimento da segurança de componentes deve ser utilizado para auxiliar na otimização de projetos, redução de peso e redução de custo. Em algumas situações, deseja-se conhecer o nível de tensões residuais

simplesmente para qualificar processos que, normalmente, introduzem grande quantidade de tensões residuais, como o jateamento, granalhamento, soldagem, processos de trabalho à frio, fundição, conformação, usinagem e tratamentos térmicos, entre outros [2].

A princípio, a maneira mais cômoda de se determinar o nível de tensões residuais existente em um componente é através de métodos experimentais. O maior problema na aplicação de métodos teóricos ou numéricos é que os eventos que causam o desenvolvimento de tensões residuais apresentam grandes variações e os processos mecânicos ou metalúrgicos envolvidos são desconhecidos, no entanto o emprego combinado de análise numérica com métodos experimentais pode contribuir na análise numérica e vice-versa. Na Figura 1.1. é apresentada uma comparação entre os métodos analítico, numérico e o experimental.

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS			
ENFOQUE	ANALÍTICOS	NUMÉRICOS	EXPERIMENTAIS
COMPLEXIDADE DO PROBLEMA	só problemas simples	qualquer problema	qualquer problema
GEOMETRIA DA PEÇA	simples	qualquer	qualquer, c/ região acessível
ORIGEM CAMPO DE TENSÕES	simples	qualquer	qualquer
HISTÓRIA DE CARREGAMENTOS	exige conhecimento	exige conhecimento	não exige conhecimento
TIPO DE FORMULAÇÃO	elasto-perfeitamente plástico e estado plano de tensões	elasto-plástico e possibilidade de modelamento sólido	estado plano de tensões em alguns casos estado triaxial de tensões
RESULTADOS OBTIDOS	2D ou 3D	3D	maioria 2D e raramente 3D
CONFIABILIDADE NO RESULTADO	boa para problemas simples	altamente dependente da complexidade do modelamento e das hipóteses simplificadoras adotadas. Pode ser validado com experimentos	entre 50 e 95%, depende da escolha correta da técnica experimental e do nível de tensões residuais presente
APLICABILIDADE	muito baixa	restrita	alta
TEMPO ENVOLVIDO	pouco, depende do problema	dependendo da geometria e do tipo de carregamento pode levar até meses	relativamente baixo de 1 à 5 horas, porém existem técnicas que levam dias.

Figura 1.1. Comparação entre os métodos analíticos, numéricos e experimentais de determinação do campo de tensões residuais.

A grande vantagem das técnicas experimentais é que, independente do conhecimento de todo o processo de fabricação e beneficiamento, pode-se medir o campo de tensões residuais diretamente no componente final. Normalmente opta-se por técnicas não destrutivas ou semi-destrutivas que fornecem o estado de tensões residuais próximo da superfície e muitas vezes não ameaçam a integridade do componente. As técnicas destrutivas são muito fáceis de utilizar com tubos e chapas, mas também podem ser utilizadas com peças complexas e para a medição do estado de tensões residuais no interior do componente .

Apesar do grande número de técnicas de medir tensões residuais, ainda é necessária muita evolução para torná-las de fácil utilização, garantindo bons resultados com baixas incertezas, alta repetitividade e aplicabilidade para a maioria dos materiais. Por este motivo apenas o método do furo cego e o da difração de raio-x são normalizados, no entanto, também possuem limites de aplicação e permitem aperfeiçoamentos.

Neste trabalho utiliza-se uma técnica experimental derivada do método do furo cego onde a forma normalmente empregada de medir deformações superficiais, com extensômetros de resistência elétrica, é substituída pela técnica de holografia eletrônica, a qual será designada neste trabalho de forma abreviada por HE.

A combinação entre o método do furo e HE apresenta algumas vantagens que são exploradas neste trabalho: A possibilidade de medir valores localizados quando um furo de pequenas dimensões é executado, é uma destas. Dados redundantes podem ser obtidos e tratados com o método de mínimos quadrados, o que reduz os efeitos dos erros aleatórios. Como todo o processo experimental pode ser automatizado, desde a execução do furo até o tratamento dos dados, o método explorado neste trabalho apresenta grande possibilidade de se tornar prático, rápido e confiável assim como o método do furo utilizando extensômetros de resistência elétrica e o método de difração de raios-x.

Os principais fatores que motivam o desenvolvimento desta técnica são:

- a) Possibilidade de medição de tensões residuais localizadas;
- b) Possibilidade de redução da incerteza de medição do método do furo associado à holografia eletrônica graças ao uso de técnicas estatísticas sobre dados redundantes naturalmente obtidos;

- c) Possibilidade de aplicação da técnica tanto para análise qualitativa - com interpretação simples, rápida e com indicação da orientação das tensões residuais principais - como para análise quantitativa;
- d) Possibilidade de redução do tempo e do custo experimental comparado com outras técnicas quantitativas;
- e) Possibilidade de aplicação com qualquer tipo de material elástico respeitando-se os limites da técnica de furação empregada;

O trabalho se inicia com uma revisão sobre tensões residuais onde são apresentadas de forma condensada as origens e os efeitos dos campos de tensões residuais. Os principais métodos de medições de tensões residuais são apresentados no Capítulo 3. O Capítulo 4 focaliza aspectos particulares do método do furo como histórico, formulação, fontes de erros, método do furo com extensometria, com técnicas ópticas e em especial a localização do trabalho dentro da literatura atual de medição de tensões residuais com o método do furo e holografia. O Capítulo 5 enfoca o processo de execução do furo, as várias técnicas de furação e especialmente a obtenção de furos por usinagem. No Capítulo 6 são apresentados os princípios de holografia eletrônica, o processo de obtenção e a análise dos dados experimentais. O Capítulo 7 apresenta a simulação experimental de campos de tensões residuais e os resultados obtidos. No Capítulo 8 é feita a conclusão do trabalho.

## CAPÍTULO 2

# TENSÕES RESIDUAIS

---

Do ponto de vista de ciência dos materiais, tensões residuais são causadas por singularidades, denominadas de discordâncias, de escala microscópica ou macroscópica na rede cristalina dos materiais. Por este motivo as regiões onde se desenvolvem tensões residuais variam grandemente em escala: desde regiões da ordem de grandeza atômica até grandes volumes de material [4].

### 2.1. TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS

Segundo a região de abrangência, as tensões residuais podem ser classificadas em tensões residuais macroscópicas, em tensões residuais microscópicas e em tensões residuais sub-microscópicas:

#### 2.1.1. TENSÕES RESIDUAIS MACROSCÓPICAS

As tensões residuais macroscópicas se estendem sobre grandes volumes quando comparadas com o tamanho do grão do material e por isso as deformações originadas são praticamente uniformes para muitos grãos. As tensões residuais macroscópicas assumem um estado de equilíbrio e qualquer alteração no espécime, como a retirada de material ou o surgimento de uma nova superfície, exige um rearranjo das tensões para que uma nova configuração de equilíbrio seja atingida. As tensões residuais macroscópicas são quantidades tensoriais, com magnitudes e direções principais variando de região para região do espécime.

Um padrão típico de tensões residuais macroscópicas normalmente encontrado em união por processo de soldagem de chapas finas é representado pela Figura 2.1. Na figura está representada a tensão residual no plano da chapa segundo o eixo do cordão de solda e no eixo perpendicular a este. O valor máximo de tensão de tração, ocorre sobre o cordão de solda e diminui a medida que se afasta da linha do cordão até que numa determinada distância o campo de tensão inverte o sinal para satisfazer a condição de equilíbrio das tensões internas [5].



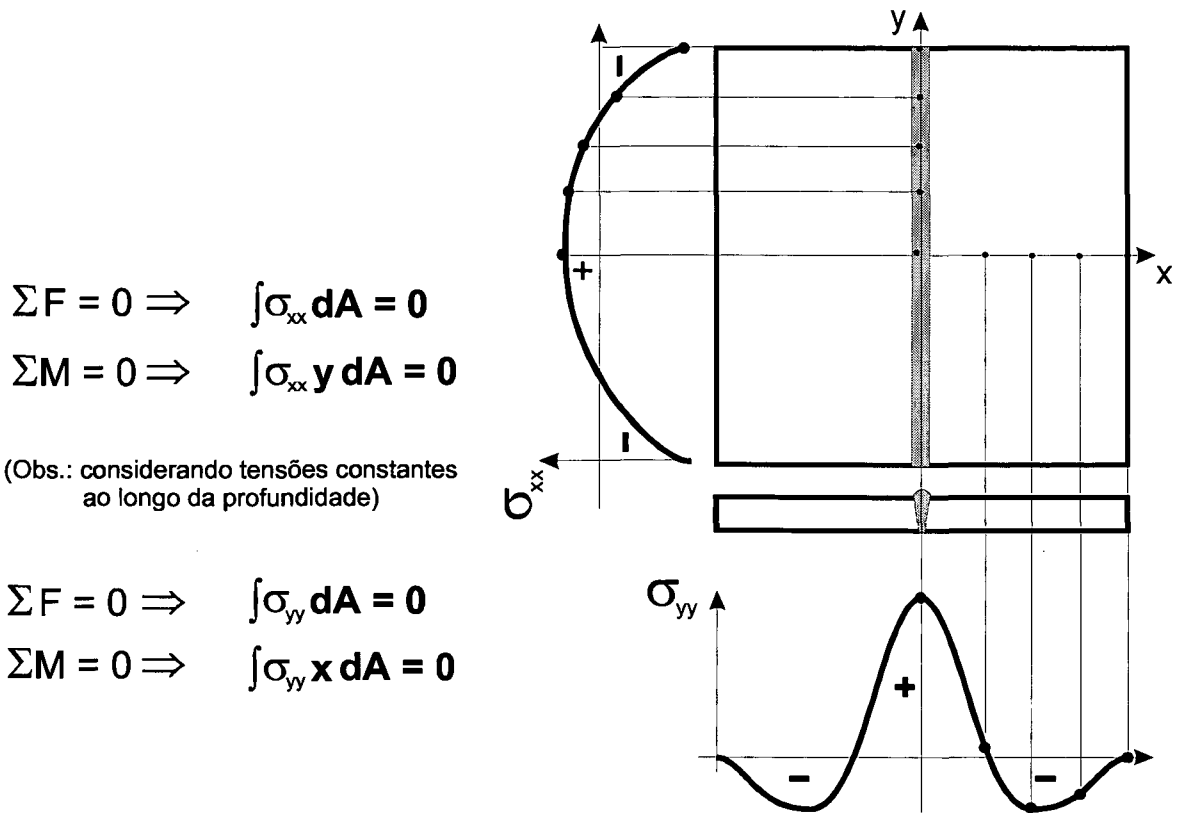


Figura 2.1. Tensões residuais nas proximidades de união por soldagem de uma chapa fina. Onde A = seção transversal do espécime, M = momentos, F = forças e  $\sigma_{yy}$  = tensões na direção y e  $\sigma_{xx}$  = tensões na direção x.

### 2.1.2. TENSÕES RESIDUAIS MICROSCÓPICAS

Tensões residuais microscópicas atuam em áreas do tamanho de um grão ou parte de um grão do material, assim a região de influência no equilíbrio destas tensões se estende a um número pequeno de grãos. Estas tensões podem variar de ponto para ponto da rede cristalina e por isso são consideradas propriedades escalares do espécime, tal como porcentagem de trabalho a frio ou dureza.

As tensões residuais microscópicas ocorrem pelo simples processo de orientação dos grãos. Num metal com grãos orientados aleatoriamente pequenos escoamentos ocorrem primeiro nos grãos cujos planos de deslizamento coincidem aproximadamente com os planos de tensão cisalhante máxima. Após a remoção da carga, os grãos que não escoaram tendem a retornar a sua

geometria inicial, no entanto, os grãos que sofreram escoamento tendem a manter sua deformação plástica permanente.

### **2.1.3. TENSÕES RESIDUAIS SUB-MICROSCÓPICAS**

Tensões residuais sub-microscópicas são resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo principalmente em regiões próximas a discordâncias. Como estas tensões surgem devido as características atômicas da rede cristalina (impurezas de ponto, vazios, etc) e o equilíbrio de forças e momentos ocorre ao longo de pequenas frações de um grão, elas também são consideradas propriedades escalares do espécime.

## **2.2. MECANISMOS DE GERAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS**

Praticamente todas as operações de manufatura introduzem tensões residuais em vários graus: Fundição, granalhamento, jateamento, forjamento, laminação, estampagem, usinagem, tratamentos térmicos e termo-químicos, soldagem, revestimentos, extrusão a frio, trefilação e dobramento são exemplos de processos que produzem tensões residuais. Em alguns casos a tensão residual pode ser introduzida mais tarde na vida da estrutura, durante a instalação, procedimento de montagem ou sobrecargas ocasionais. Outra causa de tensões residuais são os reparos ou modificações em serviço.

Os mecanismos básicos que originam as tensões residuais são comuns a muitos dos processos citados anteriormente e podem ser classificados como mecanismos de (fig 2.2.):

- deformação mecânica diferencial;
- contração ou expansão térmica diferencial;
- variações volumétricas devido à transformação de fase do material;
- variações volumétricas devido à diversificação de microconstituintes;
- desigualdades estruturais em uniões mecânicas;
- peso próprio.

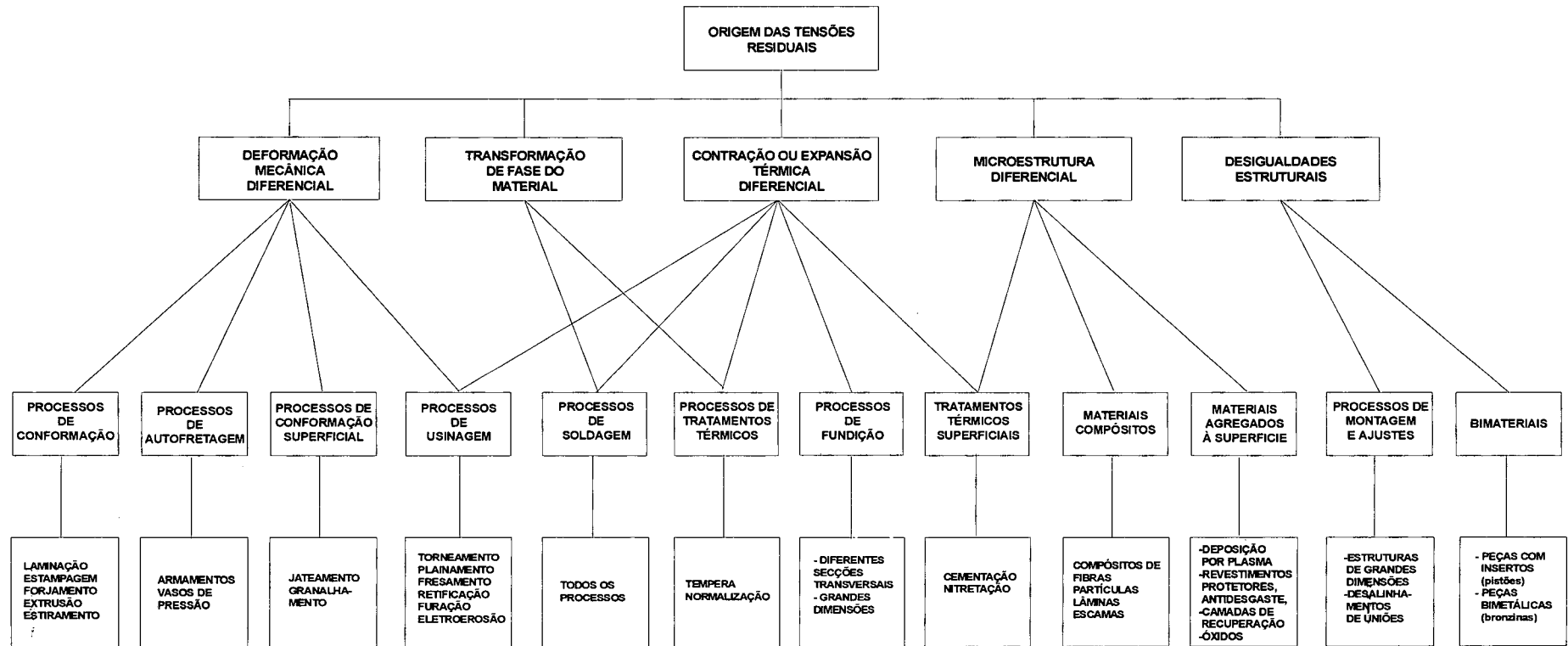


Figura 2.2. Mecanismos básicos de geração de tensões residuais em diferentes processos de fabricação e beneficiamento.

### 2.3. EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS

Diversas propriedades dos materiais, o comportamento sob carregamento estático e o comportamento sob fadiga são alterados pela presença de tensões residuais. Quando o espécime sofre a atuação de carregamento externo, o efeito resultante depende da superposição do campo de tensões originado do carregamento externo com o campo de tensões residuais previamente existente. Geralmente as tensões residuais compressivas possuem um efeito benéfico na vida de fadiga, propagação de trincas e corrosão sob tensão enquanto campos de tensões residuais trativas reduzem a performance do material sob os mesmos efeitos.

Para analisar os efeitos de um campo de tensões residuais deve-se utilizar o princípio da superposição de diferentes tipos de tensões. Caso o resultado esteja dentro do limite de elasticidade então o princípio da superposição pode ser aplicado e as tensões residuais podem ser somadas como tensões estáticas. Caso seja ultrapassado o limite de elasticidade então o campo de tensões residuais é relaxado. Desta forma as tensões residuais atuam como tensões médias e afetam o comportamento mecânico dos materiais como a fratura frágil, fadiga, corrosão sob tensão e corrosão sob fadiga. Portanto para as situações maléficas o campo de tensões resultante pode contribuir para a diminuição da resistência à fadiga, facilitar a corrosão sob tensão ou provocar a inicialização precoce de trincas e sua propagação, afetando a performance estrutural do componente, podendo levar até à sua falha.

Em ambiente corrosivo a presença de tensões residuais trativas propiciam uma maior taxa de corrosão. Processos de estampagem e repuxo profundo possuem limitações mecânicas para o fluxo de material determinadas pelas propriedades mecânicas e pela presença de tensões residuais. Outro efeito comumente encontrado é a distorção de peças que sofreram operações de usinagem. Estas distorções são dependentes da magnitude e distribuição das tensões residuais. As tensões residuais de tração podem acarretar o surgimento de micro trincas na superfície que podem se propagar e ocasionar a falha do componente.

No caso de fadiga as tensões residuais são superpostas como tensões médias e são analisadas junto com as tensões dinâmicas. A análise pode ser feita usando o diagrama de Goodman ou o diagrama de Haigh. Caso o sinal das tensões residuais seja oposto ao sinal das tensões de serviço, então é possível aumentar a amplitude da sollicitação dinâmica. No entanto como o campo de tensões residuais é aliviado com a aplicação de energia mecânica ou térmica deve ser lembrado que o uso dos diagramas de Goodman e de Haigh fornece apenas uma aproximação.

As tensões residuais são aliviadas com o tempo e de uma forma complexa dependendo de vários fatores como a aplicação de solicitação mecânica, número de ciclos de carregamento, aplicação de temperatura, o estado inicial de campo de tensões residuais e das propriedades e origem do material.

As tensões residuais são benéficas quando o campo de tensões resultante apresenta um valor máximo ou o valor de tensão média menor do que apresentaria apenas com o carregamento externo. Um exemplo do efeito das tensões residuais pode ser visto na Figura 2.3. onde as tensões devido a tração de uma barra são superpostas a um campo de tensões residuais. Existem muitos tratamentos especiais para introduzir tensões residuais na superfície (geralmente de compressão), garantindo com isso uma melhora das propriedades mecânicas do material. Em outros casos pode ser melhor ter o componente sem nenhuma tensão residual. Entre os muitos casos de introdução de campos de tensões residuais para efeitos benéficos pode-se citar o caso de sobrepressão em caldeiras, o fretamento de tubos ou canos de armas, a técnica de granalhamento aplicada em diferentes componentes e a técnica do martelamento aplicada em peças soldadas.

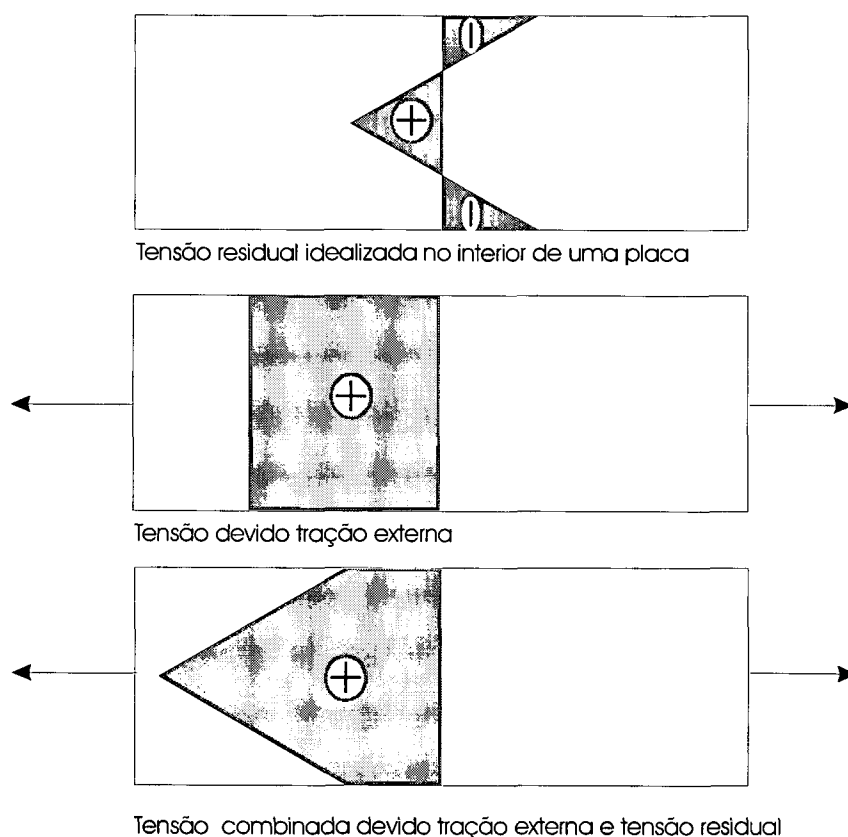


Figura 2.3. Superposição de tensões de uma placa submetida a tração com campo de tensão residual.

## CAPÍTULO 3

# MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

---

Os efeitos negativos da presença de tensões residuais são conhecidos há muito tempo. Seus efeitos benéficos começaram a ser explorados apenas por volta do final do século XIX, com a fabricação de armamentos. A determinação de compreender melhor os efeitos das tensões residuais proporcionou o desenvolvimento de uma série de técnicas, dispositivos e instrumentos de medição experimentais baseados em diferentes princípios.

Os primeiros métodos utilizados na determinação qualitativa das tensões residuais eram baseados no alívio das tensões pela realização de cortes, ou remoção de camadas por usinagem e pela medição do empenamento resultante no material. Estes princípios de medição ainda hoje são utilizados, no entanto com técnicas de medição das deformações aperfeiçoadas[2].

A sofisticação das técnicas de medição de tensões residuais, após as duas grandes guerras mundiais, acompanhou a evolução tecnológica de todas as áreas das ciências. No entanto, algumas hipóteses simplificadoras dos modelos usados para a análise dos dados experimentais, continuam inalteradas. Basicamente estas hipóteses assumem que: a) há isotropia do material, b) não há introdução de novas tensões pela técnica de medição, c) existência de campo de tensões localmente uniforme e d) a medição é feita na superfície e portanto a existência de estado plano de tensões no ponto de medição.

Existem vários métodos de medir tensões residuais e o emprego de cada um depende de vários fatores, por exemplo: a) da natureza do campo de tensões residuais que se pretende medir, b) do tempo disponível para a medição, c) da incerteza requerida, d) da extensão da região de interesse (superficial, sub-superficial ou tem-se interesse no volume total do material). Cada método possui seu domínio de aplicações bem delimitado, e fortemente dependente do problema. As técnicas mais utilizadas atualmente são: difração de raios-x, análise do ruído Barkhausen (BNA), técnicas de ultra-som, difração de raios neutrons e todas as técnicas de medição do alívio mecânico das tensões e em especial o método do furo cego, o mais utilizado.

As técnicas experimentais de determinação de tensões residuais podem ser classificadas em duas principais categorias: as que utilizam métodos não invasivos de medição (sem alteração do estado de tensões existente) e as que utilizam métodos invasivos de medição (baseados nos efeitos causados pelo alívio artificial das tensões residuais). Neste texto os métodos experimentais são classificados segundo o princípio que seguem: métodos não invasivos e invasivos (Figura 3.1.).

MÉTODOS NÃO INVASIVOS

Os métodos não invasivos, por serem não destrutivos, apresentam um forte potencial de aplicação. No entanto, no atual estágio de desenvolvimento ainda apresentam limitações: ou grandes incertezas, ou alto custo, ou então são aplicáveis a uma gama restrita de materiais que apresentam, por exemplo: baixo nível de inclusões, não existência de orientações preferenciais na micro-estrutura, tamanho de grão e propriedade magnética adequadas.

Os principais métodos não invasivos, capazes de medir o estado de tensões residuais sem relaxação das tensões, podem ser subdivididos em três princípios: acústicos, magnéticos e ópticos. Destes, o mais utilizado envolve difração óptica.

Os campos de tensão produzem apenas efeitos de segunda ordem nas grandezas captadas pelos métodos acústicos e magnéticos, justificando sua forte dependência com o material da peça, sua geometria e da natureza do campo de tensões residuais presente. Estes métodos estão sujeitos a grandes erros devido a orientação preferencial, trabalho a frio, temperatura e tamanho de grão do material, o que os obriga a usar peças de referência, isentas de tensões residuais. Como as peças isentas de tensões residuais devem ser idênticas ao material analisado, estes métodos não são

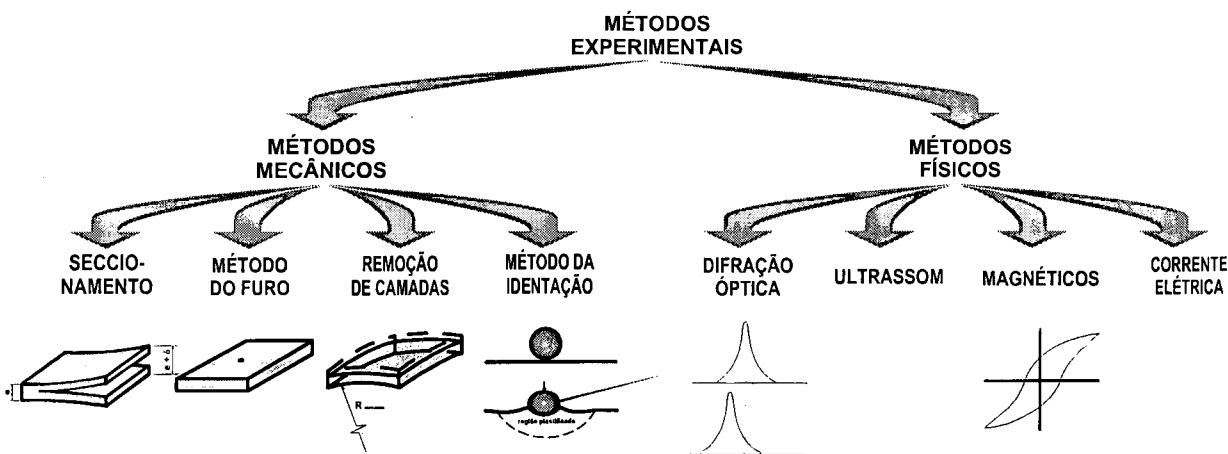


Figura 3.1. Métodos experimentais de medição de tensões residuais.

propícios para aplicação de rotina na determinação de tensões residuais em peças variadas, pelo menos no atual estágio do desenvolvimento. Apesar dos fatores citados e da limitada resolução espacial e com a profundidade, as técnicas baseadas no ultra-som e magnéticas apresentam um forte potencial para aplicação prática, apesar de ainda existirem problemas complexos a serem resolvidos.

Os métodos de difração estão sendo muito empregados atualmente por serem os únicos plenamente não destrutivos com resultados satisfatórios. Estes métodos de difração medem o espaçamento atômico na rede cristalina do metal tensionado e o comparam com o espaçamento atômico do metal livre de tensões. Este processo é feito sem destruição da peça. Como principais limitantes das técnicas de difração tem-se o tempo necessário para a medição, a influência da micro-estrutura principalmente quando esta sofre distorções devido a tratamentos térmicos, o custo dos aparelhos e o fato de apenas medir não-destrutivamente na superfície. A difração de neutrons é uma exceção, pois pode medir o nível de tensões em camadas profundas, no entanto, além do preço proibitivo, possui outras limitações que inviabilizam sua aplicação fora de laboratórios de pesquisa.

Na Figura 3.2. são apresentados vários métodos não invasivos aplicáveis a medição de tensões residuais e o estado da arte de alguns deles.

## **MÉTODOS INVASIVOS**

Os métodos invasivos são considerados destrutíveis ou semi destrutíveis, pois parte do material deve ser removida para se realizar a medição da relaxação de tensões. As deformações ou os deslocamentos, causados pelo alívio das tensões, permitem avaliar a distribuição original do campo de tensões residuais. As tensões determinadas por estes métodos são de natureza macroscópica.

Os métodos invasivos não são sensíveis às características da micro-estrutura e propriedades magnéticas do material, no entanto, devido ao fato de modificarem o estado da peça, não podem ser exatamente repetidos para a checagem direta dos resultados.

O princípio básico dos métodos invasivos leva em consideração que um espécime livre de forças e momentos externos, mas internamente tensionado, possui uma distribuição interna de tensões em equilíbrio portanto com a resultante de forças e momentos igual a zero. . Sendo removida uma porção do espécime, a distribuição de tensões internas, no material remanescente, se rearranja para produzir, novamente, zero como resultante de forças e momentos na nova configuração. Este rearranjo das tensões causa deformações que podem ser medidas nas superfícies



externas por diversos métodos experimentais.

A distribuição de tensões residuais não uniformes pode ser obtida com aproximações pela remoção seqüencial de pequenas quantidades de material, através da qual a distribuição de tensões pode ser assumida uniforme. Isto é possível porque a distribuição de tensões internas no material removido possui a resultante de forças e momentos exatamente iguais em magnitude e com sinal contrário à resultante das forças e momentos do material remanescente.

Os métodos invasivos podem ser subdivididos em destrutivos e semi-destrutivos:

- a) Métodos totalmente destrutivos incluem o de furo passante, seccionamento completo, usinagem de camadas e corte de rasgos.
- b) Métodos invasivos semi-destrutivos incluem usinagem de furo cego, trepanação e indentação.

Na Figura 3.3 e 3.4. estão esquematizados os principais processos de alívio mecânico de tensões residuais, separados conforme a geometria do espécime a ser ensaiado: chapas, cilindros, tubos, blocos ou espécimes de geometria variada e anéis. Uma descrição mais detalhada dos principais métodos invasivos e não invasivos será feita nos próximos sub-capítulos.

Quanto à aplicação dos principais métodos experimentais quantitativos, semi ou não destrutivos de medição de tensões residuais, ocorre a seguinte delimitação [107]:

MÉTODO	Tensões Residuais Superficiais (< 0,1 mm de prof.)	Tensões Residuais Subsuperficiais (> 0,1mm de prof.)	Tensões Residuais no Volume do Material	Incerteza de Medição “Benchmark”
Furo Cego com Rosetas	atende	muito adequado	-	+/-20 MPa
Difração Raios-x	muito adequado	atende	-	+/- 20 MPa
Difração Raios Neutrons	-	-	muito adequado	+/- 30 MPa

Muitos métodos apresentados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 possuem apenas aplicação qualitativa ou são métodos destrutivos que não podem ser comparados diretamente com a medição de tensões residuais com holografia eletrônica. Portanto a referência (“benchmark”) para o método proposto é o método do furo cego com rosetas extensométricas, pois ambos atendem a medição de tensões residuais sub-superficiais com incertezas da ordem de 20 MPa.

MÉTODO	ESTADO DA ARTE	GRANDEZA MEDIDA	TIPO DE MEDIÇÃO		UTILIZAÇÃO				INFLUÊNCIAS EXTERNAS	
			Quantitativa	Qualitativa	Grau de utilização	Grau de dificuldade do ensaio	Perigo na utilização	Amostra livre de tensões	Caract. Metalúrgicas	Vulnerabilidade à erros
DIFRAÇÃO DE RAIO-X [ 2, 6 ]	muito desenvolvido	espaçamento intercristalino	☺☺☺	☺☺	☺☺☺	☹☹	☹☹	☹☹☹	☹☹	☹
DIFRAÇÃO DE NEUTRONS [ 11 ]	muito desenvolvido	espaçamento intercristalino	☺☺☺	☺☺	☺	☹☹	☹☹☹	☹☹☹	☹☹	☹
ACUSTOELASTICIDADE [ 2, 18 ]	desenvolvida	birefringência acústica	☺	☺☺☺	☺	☹☹☹		☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹
VIDEOGRAFIA ULTRASSÔNICA[ 17 ]	necessita desenvolvimento	variação da velocidade das ondas ultra-sônicas de superfície.	☺	☺☺☺	☺	☹☹☹		☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹
TÉCNICA BARKHAUSEN [ 15 ]	desenvolvida	ruído magnético	☺☺	☺☺☺	☺☺	☹		☹☹☹	☹☹☹	☹☹
FOTOELASTICIDADE [ 142 ]	desenvolvida com uso restrito	birefringência óptica	☺☺	☺☺☺	☺☺	☹		☹	☹	☹
CORRENTE ELÉTRICA [ 141 ]	em desenvolvimento mas uso restrito	variação da resistividade	☺☺	☺☺☺	☺	☹		☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹
TERMOELASTICIDADE	experimental	variação da temperatura		☺	☺	☹☹☹		☹☹☹	☹☹☹	☹☹☹
CORRENTE DE FUGA	necessita desenvolvimento	perturbação da corrente induzida		☺						
PROVA ELETROLÍTICA	experimental	mede o potencial eletroquímico		☺						
ANÁLISE AUGER	experimental			☺						
NUCLEAR "HYPERFINE" (MOSSBAUER)	experimental e uso restrito			☺		☹☹☹	☹☹☹			
RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR	experimental com uso restrito			☺						
ABSORÇÃO MAGNÉTICA	experimental			☺						
EMISSÃO ACÚSTICA	experimental	ondas ultra-sônicas devido ao relaxamento de tensões		☺		☹☹☹				
VIBRAÇÃO SÔNICA DE FUGA	uso potencial	frequência natural de ressonância		☺						
EMISSÃO EXOELETRON	experimental			☺						
ANIQUILADOR ELÉTRONS	experimental			☺						
LEGENDA		TIPO DE MEDIÇÃO	GRAU DE UTILIZAÇÃO	DIFICULDADE DO ENSAIO	SEGURANÇA PESSOAL	AMOSTRA LIVRE DE TENSÕES	CARACT. METALÚRGICAS		VULNERABILIDADE À ERROS	
☺☺☺	☹☹☹	muito adequada	muito utilizada	muito complexo	muito perigosa	imprescindível	muito influenciável		muito vulnerável	
☺☺	☹☹	menos empregada	pouco utilizada	complexo	perigosa	problema contornável	influenciável		vulnerável	
☺	☹	possibilidade de aplicação	raramente utilizada	simples	pouco perigosa	sem necessidade	pouco influenciável		pouco vulnerável	
		aplicação inviável	uso desconhecido	sem informação	nenhum risco	desconhecido	desconhecido		desconhecido	

Figura 3.2. Técnicas de Medição de Tensões Residuais [125]

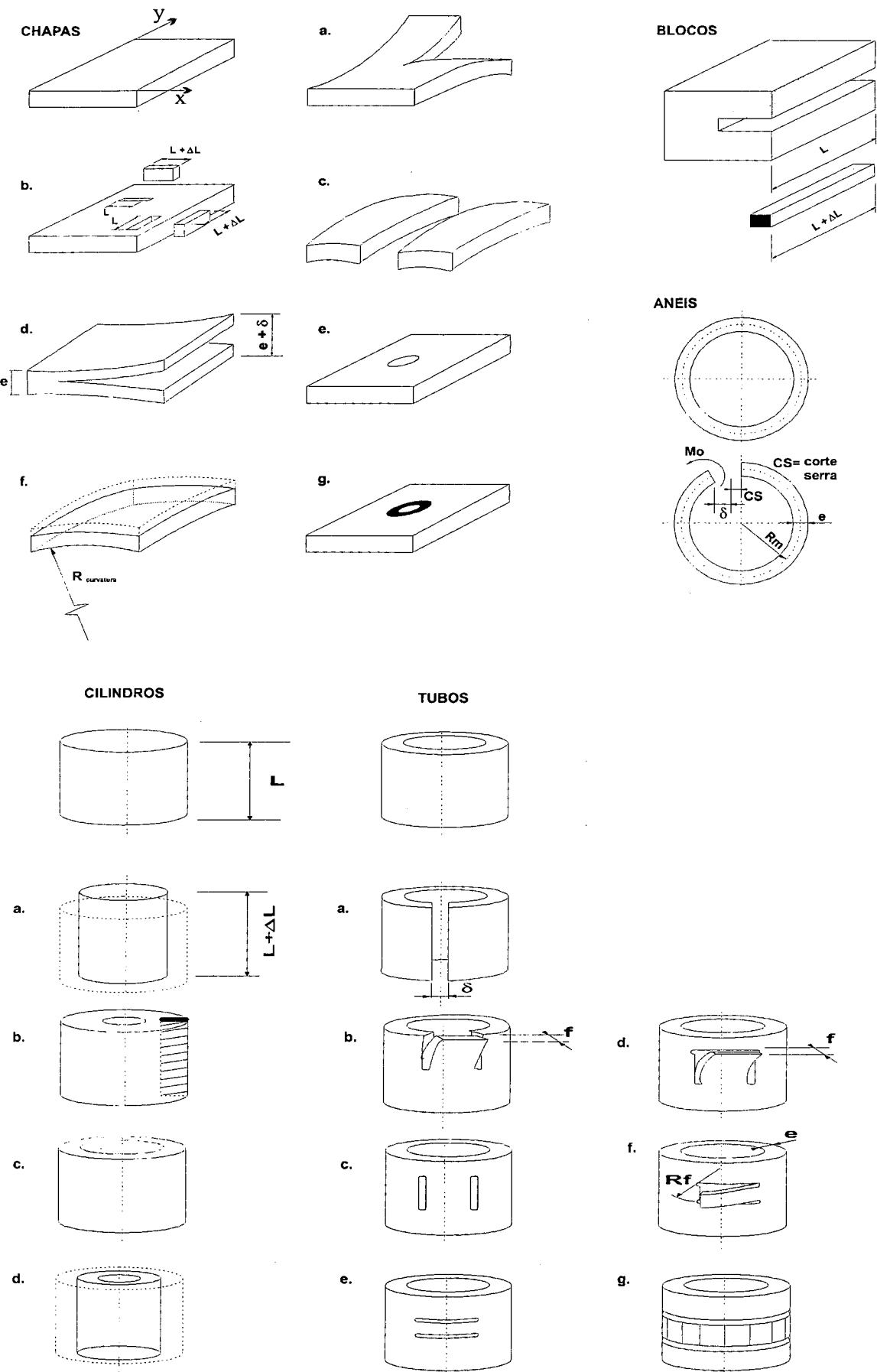


Figura 3.3.Principais métodos de alívio mecânico de tensões residuais.

GEOMETRIA	MÉTODO DE ALÍVIO	TENSÃO OBTIDA			GRANDEZA MEDIDA			
		Longitudinal / Axial	Transversal / circunferencial	Normal / Radial	$\epsilon_x$	$\epsilon_y$	$\epsilon_\theta$	$\epsilon_{zz}$
(1) CHAPAS	(a) método do seccionamento parcial transversal							
	(b) método por retirada de bloco de material							
	(c) método do seccionamento completo							
	(d) método do seccionamento parcial longitudinal							
	(e) método do furo							
	(f) método da remoção de camadas							
	(g) método da trepanação							
(2) BLOCOS	método por retirada de bloco de material							
(3) ANÉIS	método do seccionamento completo							
(4) CILINDROS	(a) método de retirada de material do diâmetro externo							
	(b) método da usinagem de furo							
	(c) método de retirada de material do diâmetro interno							
	(d) método do furo acoplado com retirada de material do diâmetro							
(5) TUBOS	(a) método do seccionamento total							
	(b) método do seccionamento parcial							
	(c) método do seccionamento localizado longitudinal							
	(d) método do seccionamento localizado com corte parcial							
	(e) método do seccionamento localizado transversal							
	(f) método do seccionamento localizado transversal com corte							
	(g) método do seccionamento total de fatias de um anel							

Figura 3.4. Técnicas de Alívio Mecânico para Medição de Tensões Residuais [143,144,145]

### 3.1. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

O método de difração envolve medições do espaçamento interplanar da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos e colimados de raios-x. Esta grandeza é indiretamente medida através da posição angular da linha de difração. Conhecendo-se o ângulo da linha de difração para um espécime livre de tensões residuais pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise e utilizá-la para calcular o campo de tensões residuais (Figura 3.5.). Portanto a distância entre os átomos da rede cristalina é empregada como uma medida indireta associada ao estado de tensões do material [6,7,8,9].

O princípio de medição de tensões residuais por difração de raios-x é baseado na lei de Bragg dada pela seguinte equação:

$$\lambda = 2 * d_{(hkl)} * \text{sen } \theta_{(hkl)}$$

onde:  $\lambda$  é o comprimento de onda do raios-x,

$d_{(hkl)}$  é o espaçamento interplanar dos planos com a normal (hkl),

$\theta_{(hkl)}$  é o ângulo de difração do plano (hkl).

(hkl) são os índices de Müller dos planos cristalinos

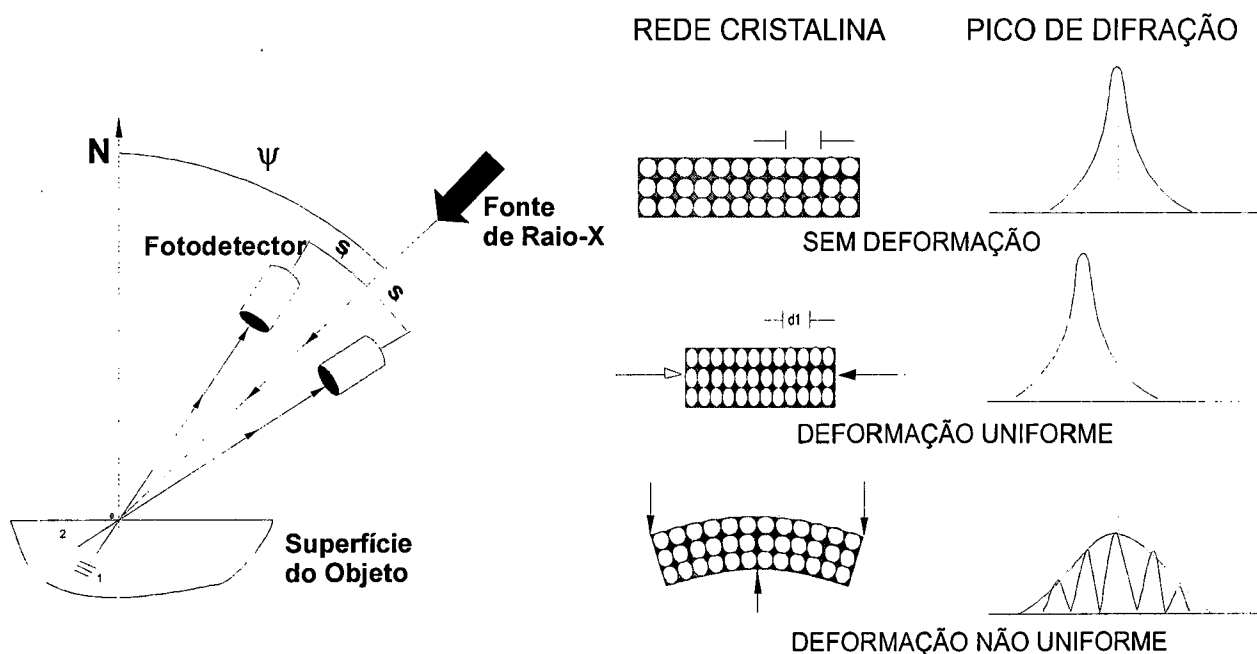


Figura 3.5. Variação da posição da linha de difração provocada pela presença de tensões residuais

Como  $\lambda$  é fixo, a variação de  $d_{(hkl)}$  modifica o ângulo de difração. Maior sensibilidade é obtida quando o arranjo de medição possui um ângulo entre o feixe incidente e o difratado o mais próximo de  $180^\circ$ , ou seja quando  $\theta$  é próximo de  $90^\circ$  e  $\sin \theta$  é próximo de 1.

A deformação da rede cristalina pode ser obtida utilizando-se a variação do ângulo de difração pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \frac{(d_{\phi,\psi} - d_o)}{d_o} = - \frac{(\theta_{\phi,\psi} - \theta_o)}{\tan \theta}$$

onde:  $2\theta$  = ângulo entre o feixe incidente e o difratado,  
 $\Psi$  = ângulo dado pela normal à superfície e o plano formado pelos feixes incidente e difratado,  
 $\phi$  = ângulo do difratômetro ao redor da superfície segundo um eixo de coordenadas da peça,  
 $\varepsilon_{\phi,\psi}$  = deformação num ângulo  $\phi$  e  $\Psi$ ,  
 $d_o$  = espaçamento da rede cristalina para cristal livre de tensões,  
 $d_{\phi,\psi}$  = espaçamento da rede cristalina num ângulo  $\phi$  e  $\Psi$ ,  
 $\theta_o$  = ângulo de difração para cristal livre de tensões,  
 $\theta_{\phi,\psi}$  = ângulo de difração para o ângulo  $\phi$  e  $\Psi$ .

A conversão entre deformação e tensão é dada por:

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \left( \frac{1 + \nu}{E} \right) \sigma_\phi \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2)$$

onde:  $\nu$  = coeficiente de Poisson,  
 $E$  = módulo de elasticidade,  
 $\sigma_\phi$  = tensão no plano na direção de  $\phi$ ,  
 $\sigma_{1,2}$  = tensões principais no plano.

Como os instrumentos de difração de raios-x basicamente medem os ângulos nos quais ocorrem a máxima intensidade difratada para cada posição de irradiação da amostra cristalina, alguns instrumentos utilizam filmes sensíveis a esta radiação e outros, mais modernos, são baseados em fotodetectores eletrônicos. Através dos fotodetectores pode-se facilmente identificar o ângulo de máxima irradiação com pequena incerteza. Já o emprego de filme fotosensível conduz a maiores erros, principalmente devido a ocorrência de bordas mal definidas e manchas.

Existem três técnicas básicas de medição das tensões residuais utilizando a difração de raios-x: a técnica da dupla exposição, a técnica da simples exposição e a técnica de múltiplas exposições. A quantidade de exposição se refere a quantidade de ângulos de exposição, isto é, ângulos entre a normal à superfície da peça e o plano formado pelo feixe de raios-x incidente e o difratado.

Tipicamente, o método de difração de raios-x é empregado para determinação do campo de tensões numa camada em torno de  $5\mu\text{m}$  mas, quando aplicada em conjunto com técnica de

decapagem química, possibilita análise de profundidades maiores, em torno de 0,1mm ou mais, e também a determinação de gradientes de tensões ao longo da profundidade. A área da superfície amostrada depende do diâmetro do feixe de raios-x. Em alguns instrumentos este diâmetro pode variar em torno de 1 a 8mm.

O método de difração de raios-x exige operadores especializados principalmente devido à cuidadosa preparação da superfície com a decapagem química e a remoção de camadas. O equipamento é muito dispendioso e apresenta perigo devido a irradiação.

A incerteza do método de difração de raios-x é altamente afetada por uma variedade de parâmetros metalúrgicos como: tamanho de grão, impurezas e vazios, que são muitas vezes impossíveis de serem quantificados para que correções possam ser aplicadas. Os resultados das medições são menos afetados por erros quando as seguintes condições são satisfeitas: (a) os materiais possuem um comportamento linear elástico, (b) quando o material policristalino é homogêneo e isotrópico, i. é., pelo menos na região irradiada pelos raios-x e (c) quando as tensões são constantes na área irradiada. Com estes cuidados, a incerteza do método é de cerca de  $\pm 20$  MPa, influenciada principalmente pela incerteza de medição dos ângulos pelo goniômetro, na ordem de 0,5 minuto.

### 3.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS NEUTRONS

O método de difração de raios neutrons é um método relativamente novo, mas segue o mesmo princípio do método de difração de raios-x. A diferença fundamental, com relação ao método de raios-x, é que os raios neutrons penetram profundamente no interior do material, possibilitando a determinação de todas as três componentes principais de tensões.

A incerteza do método de difração de raios neutrons é praticamente a mesma da difração de raios-x, quando utilizada adequadamente. A grande vantagem, de determinação completa do vetor tensão no volume do material, não pode ser estendida para a superfície, sem o risco de obter resultados errados. A aplicação direta do método para medição próxima da superfície é impossível devido a necessidade inerente do método de amostrar um volume totalmente contido no interior do material. A variação do campo de tensão com a profundidade também não pode ser determinada com suficiente precisão. Muitas destas e outras dificuldades do método tem sido estudadas e algumas resolvidas, no entanto a disponibilidade de fontes de neutrons e o custo das medições continuam impossibilitando sua disseminação como técnica de uso industrial ou laboratorial [10,11,12,13,14].

3.3. O MÉTODO BARKHAUSEN

O princípio dos equipamentos capazes de determinar tensão residual utilizando o método Barkhausen (BNA) é a medição da amplitude do ruído eletromagnético provocado pela magnetização local de materiais ferromagnéticos em análise. O ruído é criado a partir do movimento forçado das paredes no domínio magnético ( Figura 3.6.), ou seja, a magnetização local provoca o rearranjo dos dipolos magnéticos do material, que se agrupam em regiões hipoteticamente delimitadas por paredes. Este rearranjo magnético acontece de forma que, a medida que o material assume uma magnetização, as regiões se unem formando regiões maiores de mesma orientação magnética. Este crescimento da área magneticamente orientada ocorre de forma incremental e repentina gerando o ruído [15].

O instrumento típico de medição pelo método de Barkhausen (BNA) consiste de duas partes: a unidade central e o cabeçote móvel. O cabeçote é responsável pela magnetização, pela captação do ruído gerado e pelo volume de material amostrado, aquele que influencia na geração do sinal de saída. O volume amostrado para um cabeçote de uso genérico é aproximadamente da forma de um disco de diâmetro em torno de 5mm e profundidade em torno de 0,3 mm dentro do metal.

A sensibilidade à micro-estrutura do método exige padrões de calibração livres de tensão ou com uma tensão residual conhecida. Para calibrar o instrumento de Barkhausen pode-se utilizar o teste de flexão de quatro pontos, no entanto é necessário material de mesma composição química e com exatamente a mesma microestrutura da peça a ser medida.

A aplicação principal do método de Barkhausen (BNA) é para indicação qualitativa, sendo que, quantitativamente, exige muito conhecimento do material em análise, pois do contrário, pode apresentar péssimos resultados quando comparado com os métodos de raios-x ou método do furo. Este fato é devido a alta sensibilidade do método às características metalúrgicas da peça.

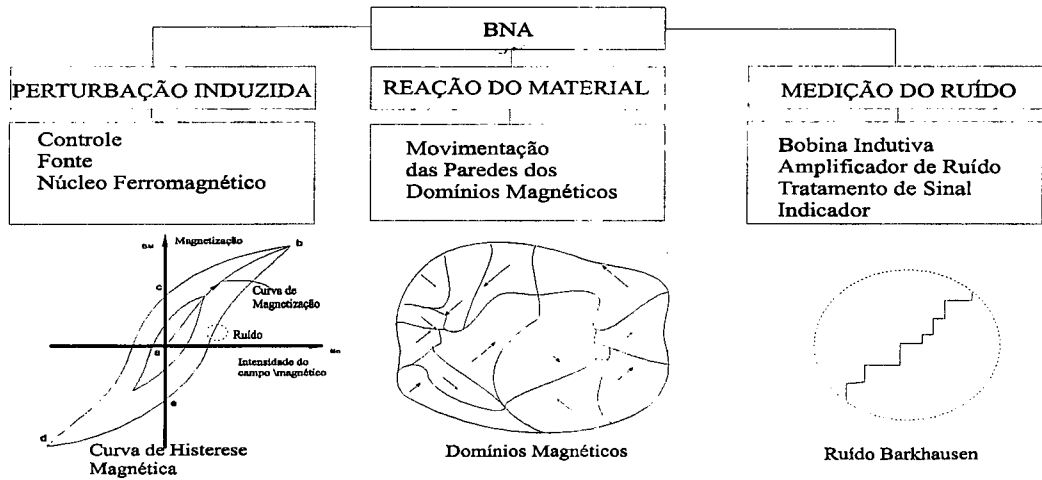


Figura 3.6. Esquema de funcionamento do método de Barkhausen = BNA.



### 3.4. ULTRA-SOM

Os métodos de medição de tensões residuais baseados na utilização de ondas ultra-sônicas são baseados no fato que de a velocidade de propagação, tanto das ondas de superfície como das ondas transversais e das longitudinais, variam aproximadamente de forma linear com o nível de tensões. O nível de tensões residuais normalmente pode ser detectado de duas formas diferentes: pela medição direta da variação da velocidade de propagação da onda e pela exploração do efeito de birefringência (técnica da acustoelasticidade) [16,17,18,19].

O grande interesse na técnica está na possibilidade de aplicá-la como técnica não destrutiva na medição do tensor tensão completo. No entanto, a tecnologia envolvida na medição da variação da velocidade e o nível de conhecimento das diversas características do material, que também alteram a velocidade de propagação das ondas, devem evoluir muito.

Atualmente, esta técnica sofre limitações em função de: alterações da estrutura do grão; existência de orientação preferencial (textura cristalográfica); presença de microtensões; distribuição e densidade de discordâncias e da existência de múltiplas fases e gradientes na composição, que provocam a variações da velocidade sem ocorrer alterações do campo de tensão. O método possui outras dificuldades como: (a) necessidade de produzir ondas com características especiais, (b) necessidade de medir pequenas variações de velocidade, (c) instabilidade do material dos transdutores, (d) não repetibilidade da medição devido a influência da rugosidade da superfície no acoplamento entre o material analisado e o transdutor.

### 3.5. MÉTODO DE REMOÇÃO DE CAMADAS

O método de remoção de camadas é um dos mais antigos na medição de tensões residuais, aplicando-se, especificamente, para barras retangulares ou chapas (Figura 3.7.). O método possui variantes, mas normalmente, são observadas distorções da peça (curvatura) e então extraídas informações qualitativas. Análises quantitativas podem ser feitas através de medições mais cuidadosas das deformações ou pelo emprego conjunto com técnicas de difração de raios-x [20].

O processo de remoção de material geralmente adotado com esta técnica é o ataque químico, pois não introduz tensões residuais e a espessura da camada retirada pode ser muito bem controlada. O montante de metal removido é controlado pelo tempo de imersão na solução química, sendo que a profundidade das camadas normalmente removidas variam entre 0,005 a 0,05mm. Os reagentes químicos podem variar conforme o material a ser atacado, mas em geral é empregada uma solução de ácido clorídrico, também conhecida como água régia ou ácido muriático.

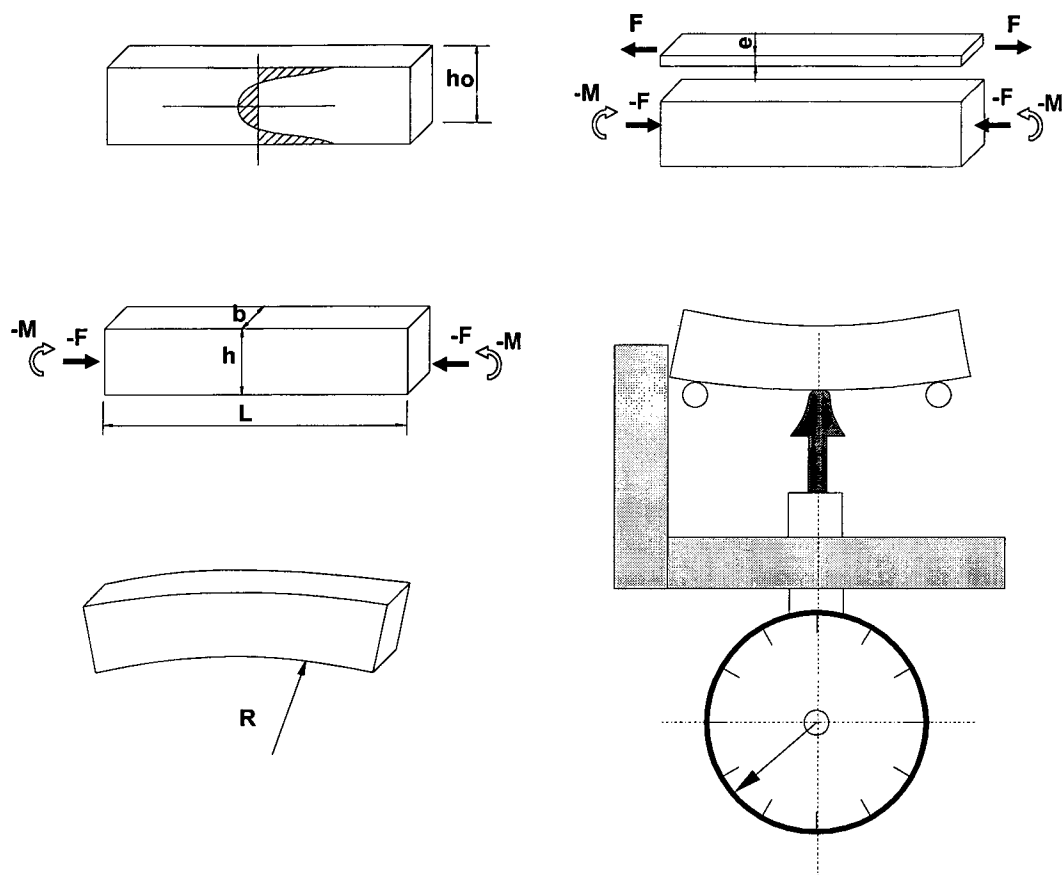


Figura 3.7. Princípio de medição do método de remoção de camadas.

Em geral a curva formada pelos espécimes, após a remoção de camada, pode ser medida através de um dispositivo com dois apoios cujas coordenadas são bem conhecidas e um sistema apalpador. Como o método de remoção de camadas é um processo incremental, o valor de tensão em cada camada é relacionado com a variação da curvatura devido a retirada do material da camada específica e com a curvatura total proveniente da influência das camadas retiradas anteriormente.

Como a tensão calculada é uma tensão média sobre toda a largura da peça onde foi removida a camada, a técnica apresenta problemas quando o campo de tensões varia acentuadamente na direção longitudinal da camada removida. Este tipo de situação ocorre com peças soldadas, onde a distribuição de tensão ao longo da superfície possui um gradiente muito grande na direção perpendicular ao cordão de solda. Neste caso, a distribuição de tensão real pode ser muito diferente da obtida pela formulação de remoção de camadas normalmente utilizada.

Existe uma variante do método de remoção de camadas aplicado à medição de tensões residuais em cilindros, conhecido como método de Sachs. Este método somente é aplicável em componentes possuindo simetria rotacional, na forma e na distribuição de tensão, o que possibilita obter as tensões principais segundo as três direções principais.

O método de determinar tensões residuais longitudinais, radiais e circunferenciais em peças axisimétricas, cilindros sólidos ou vazados, consiste em medir as deformações desenvolvidas na superfície externa do espécime quando é removido material da superfície interna (Figura 3.8.). Através da usinagem do cilindro, pode-se obter o perfil de tensão residual a partir da superfície externa até seu centro.

Um método derivado do método de "Sachs", consiste em realizar a usinagem da superfície externa de cilindros ocos, medindo as variações de deformação na superfície interna através do uso de extensômetros de resistência (Figura 3.8.). Os valores são associados, passo a passo, ao diâmetro do cilindro à medida que este vai sendo usinado. O comprimento dos cilindros devem ser de duas a três vezes o diâmetro para minimizar os efeitos da borda.

Embora estes métodos sejam matematicamente bem formulados, eles são pouco empregados devido ao tempo de ensaio que normalmente leva dias, mesmo utilizando técnicas modernas de usinagem como a eletroerosão.

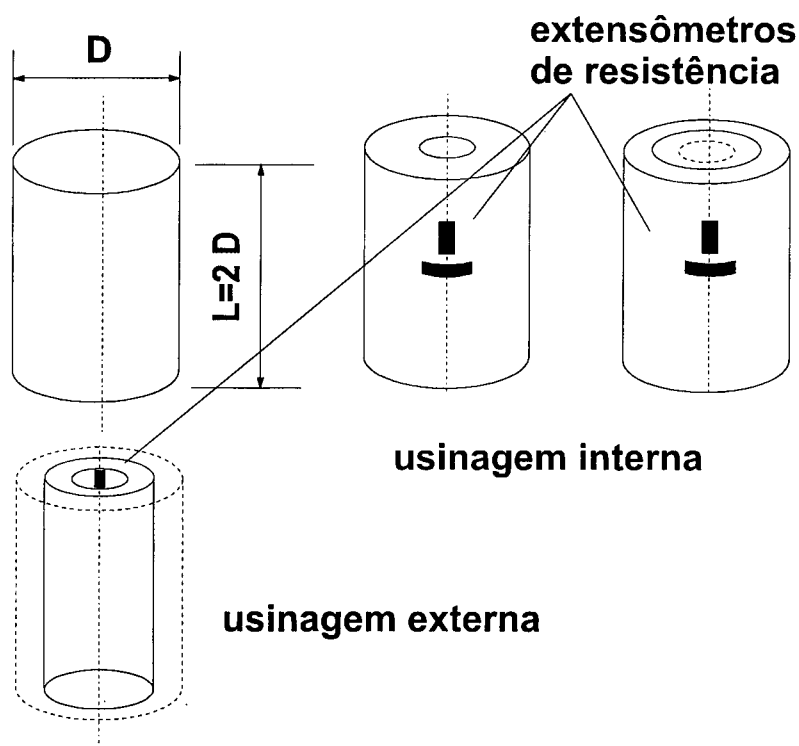


Figura 3.8. Método de Sachs e Método de Böhler.

### 3.6. ALÍVIO MECÂNICO POR SECCIONAMENTO

Alguns métodos de seccionamento foram desenvolvidos especialmente para peças cilíndricas e anéis. Estes tipos de peças, geometricamente axisimétricas, facilitam a percepção visual e o cálculo das tensões residuais [21,22].

Tubos de parede fina podem ser investigados pela realização de cortes longitudinais ou cortes circunferenciais parciais.

Tais métodos são freqüentemente utilizados como uma indicação visual do estado de tensão residual. A análise qualitativa é simples, quando a língua formada por dois cortes parciais paralelos se fecha (Figura 3.9.) significa estado compressivo na direção axial, quando se abre, significa estado de tração axial no diâmetro externo do tubo. No entanto, quando nenhuma variação ocorre após a realização de cortes parciais não significa necessariamente que a peça esteja livre de tensões: por exemplo, pode existir compressão no centro e tração em ambas as superfícies, externa e interna, de forma a resultar em um momento de flexão nulo após o corte.

O método do seccionamento, com corte radial, para peças com forma de anéis, é simples e relativamente barato. Um dos métodos consiste em medir as variações no diâmetro de anéis cortados a partir de um cilindro. O aumento do diâmetro do anel, após o corte radial, indica um estado de tensões tangenciais de tração e quando o diâmetro diminui é devido a existência de tensões tangenciais de compressão (Figura 3.9.).

O empenamento produzido pelo seccionamento de chapas e blocos também pode ser aproveitado como um indicativo das tensões residuais presentes nestes tipos de peças. Normalmente a técnica utiliza a medição das deformações através de extensômetros de resistência, o que permite uma análise quantitativa.

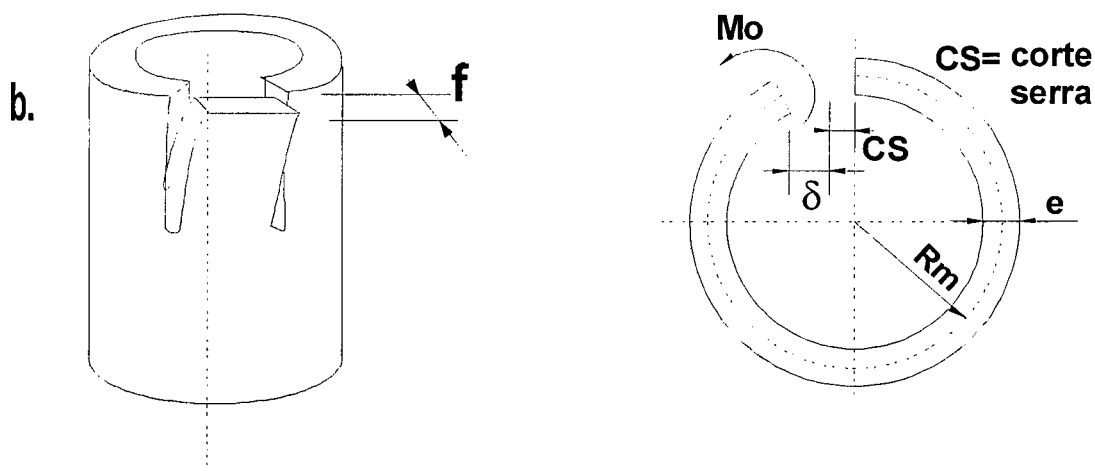


Figura 3.9. Método do seccionamento, análise qualitativa e quantitativa.

### 3.7 MÉTODO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA

O método da propagação de trinca utiliza os conceitos da mecânica da fratura aplicada na medição da distribuição de tensões residuais bidimensionais em placas onde existem grandes gradientes de tensões residuais [23,24,25].

O princípio de cálculo das tensões residuais é baseada na teoria do fator de concentração de tensão de uma trinca em um campo de tensões e do princípio de superposição, o que a torna semelhante ao método do furo cego (Figura 3.10.). No entanto, normalmente a trinca deve ser iniciada na borda e estendida sucessivamente para o interior do material.

Alguns dos fatores que causam problemas na aplicação da técnica são: o efeito de escoamento na ponta da trinca quando as tensões de tração são muito elevadas e a dependência do resultado com relação a espessura do corte.

A vantagem do método de trincamento sucessivo é que não é necessário empregar nenhum sensor com características especiais. É suficiente apenas medir os deslocamentos ou deformações na borda da placa. Além disso, o método é aplicável a diferentes geometrias como: espécimes quadrados, discos ou geometria qualquer, desde que se conheça a geometria para realizar análise utilizando processamento numérico por elementos finitos.

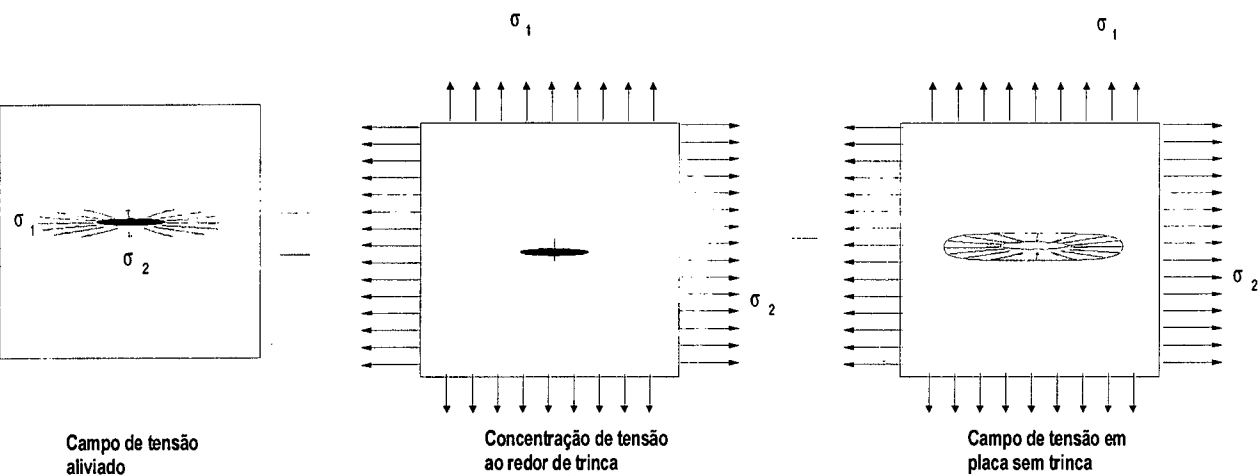


Figura 3.10. Princípio da superposição aplicado ao método da propagação de trincas

### 3.8. IDENTIFICAÇÃO

O método da indentação consiste no pressionamento de uma esfera em uma região da superfície do objeto sob análise. A pressão da esfera (Figura 3.11.), sobre a superfície do material, produz tensões locais da ordem de três vezes a tensão de escoamento do material. A deformação plástica localizada na superfície provoca o rearranjo das tensões residuais possibilitando, através da medição das deformações ou dos deslocamentos na superfície, obter qualitativamente ou mesmo quantitativamente o nível das tensões residuais [26,27,28]. A deformação plástica local é função das características de indentação, das propriedades dos materiais e da magnitude e direção das tensões residuais.

São relatados na literatura vários métodos de medir tensões residuais através de indentação baseados em:

- a. variação na medição de dureza;
- b. medição da relação entre força e profundidade da indentação;
- c. medição da forma da indentação (medição do diâmetro de uma indentação cônica);
- d. medição da deformação ao redor da indentação.

O método de medir a variação da dureza possui a desvantagem de que, uma variedade de estados de tensão na superfície podem causar a mesma tendência do material escoar sob pressão normal. O método de medição da deformação ao redor da indentação é o mais indicado para análise quantitativa. A sensibilidade do método é maior quanto maior for o diâmetro da esfera e quanto maior as forças de indentação. No entanto, na análise dos dados facilmente podem ser induzidos erros se não forem perfeitamente conhecidas as características mecânicas do material, principalmente de peças encruadas.

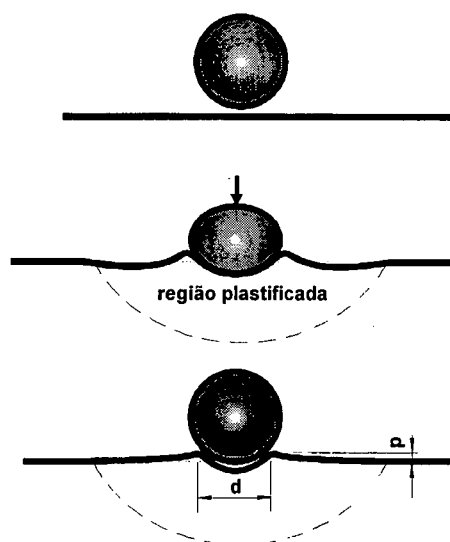


Figura 3.11. Método de indentação

## CAPÍTULO 4

# MÉTODO DO FURO

---

O método do furo cego é o método mais comumente empregado e também considerado um dos melhores métodos experimentais de medição de tensões residuais. O princípio quantitativo da técnica foi explorado pela primeira vez em 1934 por J. Mathar. Mathar utilizou a solução de Kirsch e o princípio da superposição para obter a quantificação dos níveis de tensões a partir do alívio mecânico de tensões provocado pela execução de um furo [29,30].

### 4.1 HISTÓRICO

A evolução das técnicas de medição começou com a proposta de Mathar em medir a variação do diâmetro do furo através do uso de microscópio óptico de medição, portanto sem contato. Logo após, Soete e Vancrombrugge propuseram a medição de deformação usando extensômetros de resistência e abriram o caminho das pesquisas em torno desta técnica de medição com contato mecânico..

Muita pesquisa foi desenvolvida na área relativa ao projeto das rosetas extensométricas e principalmente na formulação matemática. As mudanças na formulação matemática que mais se destacaram foram: a proposta de Boiten e Ten Gate em considerar a deformação média sobre o extensômetro, a proposta de Kelsey [31] para considerar a variação de tensão residual ao longo da espessura do material, a proposta de Vigness & Rendler [32] e a proposta de Schewchuk que melhoraram a concepção do método adotando um termo adimensional que evita calibração para cada ensaio. Outro trabalho com grande influência na técnica do furo cego foi a determinação de coeficientes de calibração pouco dependentes do material realizado por Schaejer [33].

A técnica de medição mais utilizada em conjunto com o método do furo é a técnica da extensometria. Apesar do grande número de pesquisas sobre outras técnicas de medição das grandezas relaxadas no processo de alívio de tensões, ainda nenhuma técnica emergente conseguiu conquistar mercado fora do espaço dos congressos e dos laboratórios de pesquisa. A maioria das novas técnicas emergentes, são baseadas em princípios ópticos, portanto sem contato e com alta resolução.

As técnicas ópticas que mais se destacam pela aplicabilidade ao método do furo são: holografia, "Electronic Speckle Pattern Interferometry" (ESPI) denominada neste trabalho de Holografia Eletrônica (HE) e "Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry" (ESSPI). A técnica de moiré também tem sido muito aplicada com o método do furo, no entanto exige a aplicação de um reticulado padrão sobre a superfície da peça e isto traz alguns inconvenientes.

Outras técnicas ópticas, como a de película birefringente - também conhecida por fotoelasticidade de reflexão - e as de revestimento quebradiço, apesar de pouco aplicadas, também podem fornecer informações sobre o estado de tensão. Na técnica de revestimento quebradiço o verniz, extremamente frágil, apresenta trincas devido a deformação ao redor do furo que possibilitam identificar o campo de tensão residual existente: trincas concêntricas indicam estado de compressão biaxial, trincas radiais indicam estado de tração biaxial, outras variantes podem ser vistas na Figura 4.1 [34].

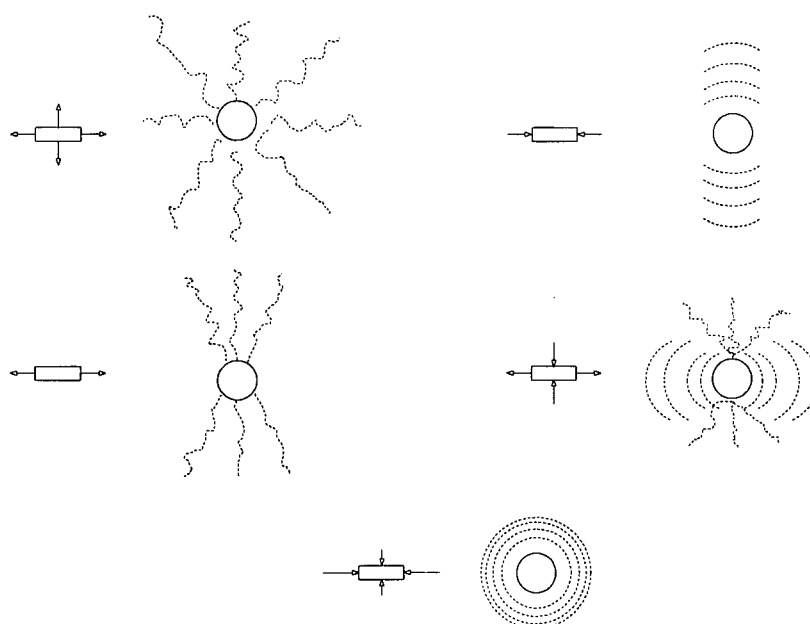


Figura 4.1.1 Trincas de revestimento quebradiço originadas do alívio, pela execução de furos, de diferentes campos de tensões.



## 4.2. PRINCÍPIOS

A modificação do estado de tensão interna de uma peça, após a execução de um furo com o objetivo de alívio de tensões, é manifestada através de deslocamentos e deformações na superfície ao redor do furo [35].

Na Figura 4.2. é enfatizado o efeito do alívio de um campo de tensão uniaxial devido à usinagem de um furo. Nesta figura são representados diversos anéis concêntricos na sua forma original e deformados depois do alívio de tensões. O efeito da deformação está ampliado algumas centenas de vezes. É importante observar que a deformação é maior nos anéis próximos da borda do furo.

Em geral as formulações matemáticas para o método do furo consideram estado plano de tensões, isotropia e homogeneidade do material e ainda o conhecimento do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson. Através da solução de Kirsch [38], e do princípio da superposição pode-se chegar a soluções analíticas exatas para campos de tensão uniaxial ou biaxial em placas finas infinitas onde o furo é passante e onde a tensão é constante com a profundidade. Desta forma, utilizando relações constitutivas para a elasticidade linear, pode-se através dos deslocamentos ou deformações medidas, calcular as tensões principais e suas orientações.

Nos casos de aplicação prática as considerações da formulação analítica exata não são totalmente aplicáveis. A condição de furo passante é a primeira que normalmente não pode ser respeitada para a maioria das peças onde a técnica é empregada. Também são poucos os casos onde a geometria da peça se assemelha a uma placa infinita.

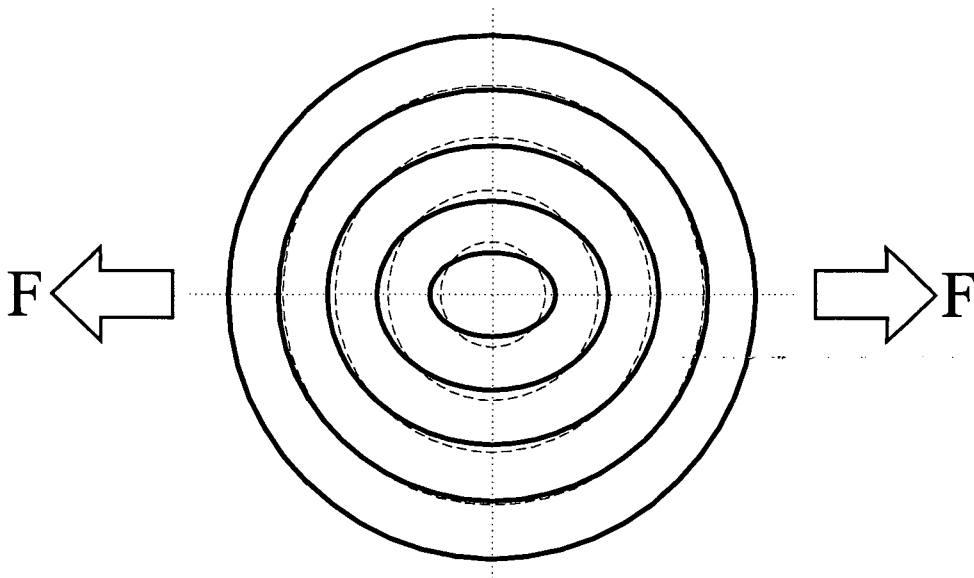


Figura 4. 2. Representação por anéis deformados, do efeito do alívio de tensões, do método do furo.

### 4.3 MODELAMENTO MATEMÁTICO

Nos desenvolvimentos a seguir serão apresentadas as formulações analíticas para o método do furo passante acoplado à medição de deslocamentos e à medição de deformações.

As formulações iniciam com a solução de Kirsch - concentração de tensão ao redor de um furo. Na sequência, são apresentadas as equações de alívio de tensões, devido à execução de um furo numa placa sujeita a um campo de tensões biaxial, utilizando o princípio da superposição. Finalmente, as equações em termos de deformações e deslocamentos são deduzidas das equações do alívio das tensões [29, 36, 37].

As formulações para o caso de furo cego são deduzidas a partir do caso do furo passante com a introdução de fatores - coeficientes - que corrigem a formulação analítica. Estes fatores de correção podem ter origem empírica ou ser provenientes de simulação numérica e variam conforme a configuração global do experimento (diâmetro, profundidade, região de amostragem) [33].

#### 4.3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO FURO PASSANTE

A execução de um furo passante em uma placa fina, sujeita a um campo uniforme de tensões, é acompanhada de modificações localizadas no campo de tensões devido ao fato de que na superfície livre interna do furo a tensão radial e a tensão cisalhante devem ser nulas:  $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$ . Estas modificações localizadas do campo de tensões são de fato um alívio de tensões. A tensão aliviada pode ser obtida subtraindo o campo de tensão que ocorre numa placa furada (solução de Kirsch) do campo de tensão em coordenadas polares para tensão em uma placa sem furo:  $\sigma'' = \sigma' - \sigma$  conforme Figura 4.3.

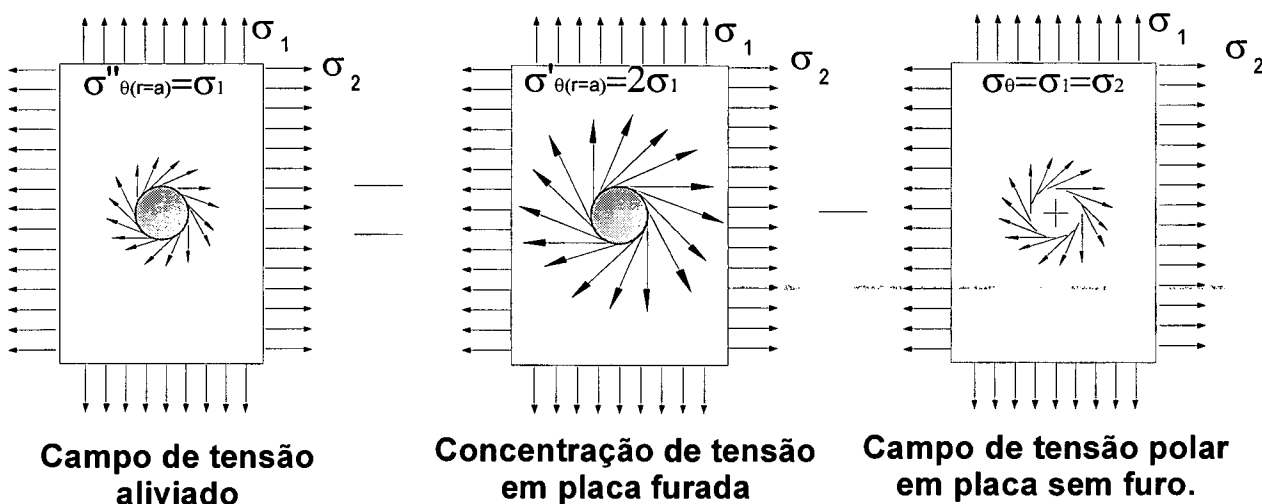


Figura 4. 3. Representação da tensão tangencial aliviada na borda de um furo  $r=a$ , pela execução do furo de raio  $a$ , em um campo de tensão biaxial.

O campo de tensões em uma placa fina retangular, contendo um furo circular passante e sujeita a um carregamento uniformemente distribuído nas bordas, foi determinado pela primeira vez por G. Kirsch em 1898, na Alemanha [38]. G. Kirsch publicou sua solução, para o caso da placa fina retangular contendo um furo circular passante e sujeita a um carregamento uniaxial de tensão, utilizando as formulações da elasticidade. Em adição às restrições normais de homogeneidade e isotropia, esta solução assume que o diâmetro do furo é pequeno comparado com a largura da placa, mas não menor do que a espessura da placa. Um furo menor pode tornar o problema tridimensional e não plano [39]. Kirsch superpôs campos de tensões uniaxiais perpendiculares que satisfazem as equações de equilíbrio e a equação de compatibilidade (equação biarmônica) em coordenadas polares e obteve a solução para o campo de tensões biaxial.

A solução de Kirsch completa para a concentração de tensão em um ponto qualquer  $P(r, \theta)$  (Figura 4.4.), ao redor de um furo passante é dada pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}\sigma'_R &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3}{\lambda^4} - \frac{4}{\lambda^2}\right) \cos(2\theta) \\ \sigma'_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{1}{\lambda^2}\right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3}{\lambda^4}\right) \cos(2\theta) \\ \tau'_{R\theta} &= (-1) \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{3}{\lambda^4} + \frac{2}{\lambda^2}\right) \sin(2\theta)\end{aligned}\quad (4.1)$$

onde:

- $\lambda = \frac{r}{a}$
- $a$  = raio do furo
- $r$  = raio qualquer
- $\sigma'_R$  = tensão radial (concentração de tensão)
- $\sigma'_\theta$  = tensão tangencial (concentração de tensão)
- $\tau'_{R\theta}$  = tensão cisalhante (concentração de tensão)
- $\sigma_{1,2}$  = tensões principais cartesianas
- $\theta$  = ângulo entre uma direção qualquer e a direção de  $\sigma_1$

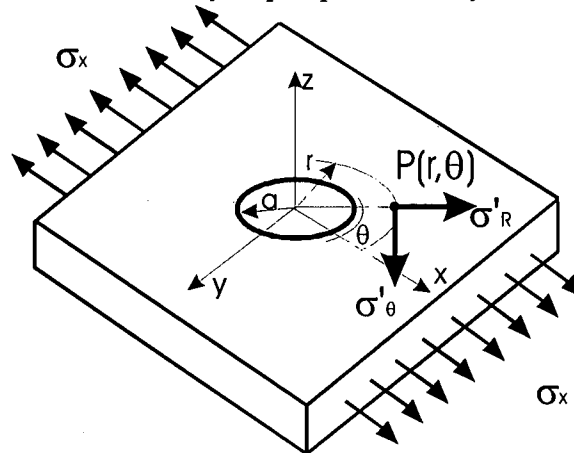


Figura 4.4. Concentração de tensões em placas finas com furo.

O campo de tensão bidimensional uniforme em uma placa fina ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) pode ser expresso em coordenadas polares em um ponto qualquer, considerando as tensões e direções principais pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}\sigma_R &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\theta) \\ \tau_{R\theta} &= (-1) \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin(2\theta)\end{aligned}\tag{4.2}$$

onde:

$\sigma_R$  = tensão radial polar

$\sigma_\theta$  = tensão tangencial polar

$\tau_{R\theta}$  = tensão cisalhante polar

$\sigma_{1,2}$  = tensões principais cartesianas

$\theta$  = ângulo entre uma direção qualquer e a direção de  $\sigma_1$

Analiticamente resolvendo a equação  $\sigma'' = \sigma' - \sigma$  (Figura 4.3.), o campo de tensões aliviadas num ponto P(r,  $\theta$ ), devido à execução do furo numa placa sujeita a um campo de tensão biaxial, é dada por:

$$\begin{aligned}\sigma''_R &= (-1) \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( \frac{1}{\lambda^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( \frac{3}{\lambda^4} - \frac{4}{\lambda^2} \right) \cos(2\theta) \\ \sigma''_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( \frac{1}{\lambda^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( \frac{3}{\lambda^4} \right) \cos(2\theta) \\ \tau''_{R\theta} &= (-1) \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( -\frac{3}{\lambda^4} + \frac{2}{\lambda^2} \right) \sin(2\theta)\end{aligned}\tag{4.3}$$

onde:  $\lambda = \frac{r}{a}$

a = raio do furo

r = raio qualquer

$\sigma''_R$  = tensão radial aliviada

$\sigma''_\theta$  = tensão tangencial aliviada

$\tau''_{R\theta}$  = tensão cisalhante aliviada

$\sigma_{1,2}$  = tensões principais cartesianas

$\theta$  = ângulo entre uma direção qualquer e a direção de  $\sigma_1$

Através das equações anteriores e da lei de Hooke aplicada à materiais elasto linear homogêneos e isotrópicos quanto as propriedades mecânicas e ao comportamento deformação/tensão, pode-se obter as equações para as deformações causadas pelo alívio de tensões

devido a usinagem do furo em um campo biaxial de tensões:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r'' &= (-1) \frac{(1+\nu)}{2E} \left[ \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{\lambda^2} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda^2} \left( \frac{3}{\lambda^2} - \frac{4}{(1+\nu)} \right) \cos(2\theta) \right] \\
 \varepsilon_\theta'' &= + \frac{(1+\nu)}{2E} \left[ \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{\lambda^2} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda^2} \left( \frac{3}{\lambda^2} - \frac{4\nu}{(1+\nu)} \right) \cos(2\theta) \right] \\
 \gamma_{R\theta}'' &= + \frac{(1+\nu)}{E} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda^2} \left( \frac{3}{\lambda^2} - 2 \right) \sin(2\theta) \\
 \varepsilon_z'' &= + \frac{2\nu}{E} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda^2} \cos(2\theta)
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

onde:

$\varepsilon_r''$  = deformação radial devido o alívio de tensões;

$\varepsilon_\theta''$  = deformação tangencial devido o alívio de tensões;

$\gamma_{R\theta}''$  = deformação cisalhante devido o alívio de tensões;

$\varepsilon_z''$  = deformação normal devido o alívio de tensões;

$\nu$  = coeficiente de Poisson

$E$  = módulo de elasticidade

Estas equações são as equações fundamentais do método do furo quando são medidas as deformações. Para obter as tensões principais estas relações devem ser invertidas e como as incógnitas são três, necessitam-se três medições independentes de deformação. Normalmente são medidas as deformações radiais ao redor do furo. Este campo de deformação radial é oposto em sinal ao campo de tensão residual inicial.

A partir daqui, por comodidade, não serão mais representadas as tensões, deformações e deslocamentos aliviados com o índice ". As equações de deformação para campo biaxial de tensões, podem ser reescritas de forma mais simples por:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r &= +A(\sigma_1 + \sigma_2) + B(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta) \\
 \varepsilon_\theta &= (-1)A(\sigma_1 + \sigma_2) - C(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta)
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

onde os coeficientes são:

$$\begin{aligned}
 A &= (-1) \frac{(1+\nu)}{2E} \frac{1}{\lambda^2} \\
 B &= (-1) \frac{(1+\nu)}{2E} \frac{1}{\lambda^2} \left( \frac{4}{(1+\nu)} - \frac{3}{\lambda^2} \right) \\
 C &= (-1) \frac{(1+\nu)}{2E} \frac{1}{\lambda^2} \left( \frac{4\nu}{(1+\nu)} - \frac{3}{\lambda^2} \right)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Pela análise da equação anterior, nota-se que a deformação radial e a tangencial variam conforme a distância do furo, diminuindo à medida que a distância aumenta, além de variarem de forma senoidal ao longo de um círculo de raio fixo. Devido a este fato, é importante que se realize a medição das deformações o mais próximo possível da borda do furo, de forma a aumentar o sinal medido. Por outro lado, aumentam os efeitos indesejáveis nas proximidades do furo: rebarbas e deformação plástica.

As mudanças na distribuição de tensão também podem ser expressas em termos de deslocamentos no plano e fora do plano na região ao redor do furo. Estas expressões são muito importantes para as técnicas ópticas de medição como Moiré, Holografia e outras.

Considerando estado plano de tensões em uma placa infinita, com carregamento uniaxial ou biaxial, pode-se aplicar o princípio da elasticidade para obter expressões para os deslocamentos ao redor de um furo usinado na placa.

Pode-se expressar os deslocamentos em função do campo de tensão inicial através das relações deslocamentos/deformações polares [36]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_R &= \frac{\partial u_R}{\partial r} \therefore \varepsilon_R = \frac{\partial u_R}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial r} \therefore \varepsilon_R = \frac{1}{a} \frac{\partial u_R}{\partial \lambda} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u_R}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{R\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_R}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_\theta}{r} \right)\end{aligned}\tag{4.7}$$

onde:

$u_\theta$  = deslocamento tangencial

$u_R$  = deslocamento radial

$w$  = deslocamento fora do plano

Pela integração da equação da deformação radial e considerando apenas campo de tensão uniaxial, obtêm-se a expressão para o deslocamento radial:

$$\begin{aligned}u_R &= +a \int \varepsilon_R d\lambda \\ u_R &= -a\sigma_1 \frac{(1+\nu)}{2E} \left[ \int \frac{1}{\lambda^2} d\lambda - 3 \cos(2\theta) \int \frac{1}{\lambda^4} d\lambda + \frac{4}{(1+\lambda)} \cos(2\theta) \int \frac{1}{\lambda^2} d\lambda \right] \\ u_R &= -a\sigma_1 \frac{(1+\nu)}{2E} \left[ -\frac{1}{\lambda} + \left( \frac{1}{\lambda^3} - \frac{4}{(1+\lambda)} \frac{1}{\lambda} \right) \cos(2\theta) \right]\end{aligned}\tag{4.8}$$

Da mesma maneira, por integração, obtêm-se a expressão para o deslocamento tangencial:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{r} \frac{\partial u_t}{\partial \theta} &= \varepsilon_\theta - \frac{u_R}{r} \\
\frac{1}{r} \frac{\partial u_t}{\partial \theta} &= -\frac{\sigma_1}{E} \left[ \frac{(1+\nu)}{\lambda^4} + \frac{2(1-\nu)}{\lambda^2} \right] \cos(2\theta) \\
\frac{\partial u_t}{\partial \theta} &= -\frac{\sigma_1 a}{E} \left[ \frac{(1+\nu)}{\lambda^3} + \frac{(1-\nu)}{\lambda} \right] \cos(2\theta) \\
u_t &= -\frac{(1+\nu)}{2E} \sigma_1 a \left[ \frac{1}{\lambda^3} + \frac{2(1-\nu)}{\lambda(1+\nu)} \right] \sin(2\theta)
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Ou generalizando para campo de tensão biaxial:

$$\begin{aligned}
u_R &= -a \frac{(1+\nu)}{2E} \left[ -\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{\lambda} + (\sigma_1 - \sigma_2) \left( \frac{1}{\lambda^3} - \frac{4}{(1+\lambda)} \frac{1}{\lambda} \right) \cos(2\theta) \right] \\
u_t &= -\frac{(1+\nu)}{2E} a (\sigma_1 - \sigma_2) \left[ \frac{1}{\lambda^3} + \frac{2(1-\lambda)}{\lambda(1+\lambda)} \right] \sin(2\theta)
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Estas são as equações relevantes para o emprego de técnicas ópticas de medição de deslocamentos, como a adotada no trabalho em desenvolvimento.

Para o deslocamento fora do plano relativo a um campo de tensão biaxial, a integração deve ser feita considerando a espessura da chapa fina, daí obtêm-se:

$$w = \frac{t}{\lambda^2} \frac{2\nu}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta) \tag{4.11}$$

onde:

$E$  = módulo de elasticidade

$$\lambda = \frac{r}{a}$$

$a$  = raio do furo

$r$  = posição radial do ponto de interesse

$t$  = espessura da placa

$\sigma_1, \sigma_2$  = tensões residuais principais

$\theta$  = ângulo entre a direção de interesse e  $\sigma_1$

$\nu$  = coeficiente de Poisson

#### 4.3.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO FURO CEGO

A teoria do método do furo cego foi desenvolvida a partir da teoria aplicada a um furo passante considerando uma placa fina e plana, com largura e comprimento muito grandes, submetida a um estado plano de tensões. Estas características, de forma e dimensão, são muito diferentes daquelas de peças onde se tem interesse de medir o campo de tensões residuais. Por este motivo é utilizada a técnica do furo cego na maioria das aplicações [40].

O método do furo cego é baseado na medição de deformações ou deslocamentos da superfície, assim como a maioria dos outros métodos mecânicos disponíveis, onde o campo de

tensões é obtido indiretamente baseado em formulações assumindo as condições de estado plano de tensões. Portanto os campos de tensões quantificados pelo método do furo são campos biaxiais de tensões na superfície do espécime e não os campos triaxiais normalmente existentes. O conhecimento destes campos biaxiais é de grande valia, pois geralmente é na superfície ou próximo a ela que ocorrem as magnitudes máximas dos campos de tensões. Normalmente estes campos de tensões não se mantêm constantes nos planos paralelos à superfície, i. é. ao longo da profundidade, variando tanto em intensidade como em orientação. No entanto, em alguns casos, pode-se aproximar os campos de tensões por funções constantes ou lineares sem muita perda de similitude.

Não se consegue uma solução "exata", pela teoria da elasticidade, para o caso da introdução de um furo cego num campo de tensão plano; ele produz um estado de tensão local muito complexo. No entanto, Rendler e Vigness mostraram que existem muitas semelhanças com a distribuição de tensão para o caso de furo passante. A deformação ou o deslocamento devido ao furo cego também variam senoidalmente ao longo de um círculo concêntrico com o furo. As equações desenvolvidas para o furo passante se aplicam normalmente mudando apenas as constantes A, B e C, por constantes  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$  que devem ser obtidas de forma experimental ou por análise de elementos finitos.

A forma generalizada funcional de expressar os coeficientes  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  e  $\bar{C}$  é:

$$\begin{aligned}\bar{A} &= f_A \left\{ E, \nu, r, \frac{h}{2a} \right\} \\ \bar{B} &= f_B \left\{ E, \nu, r, \frac{h}{2a} \right\} \\ \bar{C} &= f_C \left\{ E, \nu, r, \frac{h}{2a} \right\}\end{aligned}\tag{4.12}$$

onde  $\frac{h}{2a}$  é um fator adimensional para a profundidade h correlacionada com o diâmetro 2a.

Conforme a profundidade do furo é aumentada, para um mesmo diâmetro e mesmo campo de tensão residual, a tensão aliviada também aumenta numa taxa decrescente. O aumento da tensão aliviada passa a ser desprezável a partir de uma profundidade em torno da dimensão do diâmetro do furo. A norma ASTM E837-89 especifica profundidade máxima de  $h/(2a) = 1.2$  [41].



#### 4.4. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

A aplicabilidade do método do furo é restrita a medição de macro tensões. No entanto, o método é indiferente se as tensões são ocasionadas por carregamento externo ou são tensões residuais. Também é muito atrativo pelo fato de ser aplicável a qualquer tipo de material, desde que o furo possa ser usinado. A técnica é sensível apenas às tensões que agem no plano da superfície da peça pois a tensão ao longo da profundidade, na direção ortogonal à superfície, não pode ser diretamente medida.

Os níveis de tensões que podem ser medidos com a técnica do furo cego dependem da concentração de tensão ao redor do furo e portanto dependem do tipo de campo de tensão. Por exemplo no caso de campo de tensão uniaxial o fator de concentração de tensões é 3 segundo a solução de Kirsch para estado plano de tensões, portanto o nível máximo de tensão uniaxial possível de ser aplicado sem que aja plastificação de alguma região da borda do furo é de 33% da tensão de escoamento. No entanto para furo cego a natureza do campo de tensões tridimensionais reduz o efeito da concentração de tensões e pode-se medir níveis de até 60% da tensão de escoamento sem que ocorra presença de deformações plásticas expressivas na borda do furo. No caso de campos de tensões equi-biaxiais o limite teórico de 50% pode ser expandido até 80% da tensão de escoamento sem que a região deformada plasticamente ao redor do furo afete expressivamente o resultado da medição.

Nos casos de aplicação típica onde os campos de tensões residuais são desconhecidos é difícil avaliar corretamente os níveis máximos de tensão que ainda podem ser medidos com baixa incerteza. Campos de tensões próximos da tensão de escoamento ocorrem em muitas situações práticas. Um caso típico de campos de tensões residuais próximos da tensão de escoamento do material é o encontrado nas peças que passaram por operações de soldagem. As operações de soldagem normalmente apresentam como resultado altos campos de tensões residuais que podem ser reduzidos com procedimentos específicos e alívio de tensões posterior, no entanto em algumas situações não é possível aplicar métodos convencionais de alívio e o resultado são campos de tensões residuais muito próximos da tensão de escoamento.

A área da peça onde é amostrado o campo de tensões, portanto que exerce influência no resultado de medição, depende do diâmetro e da profundidade do furo. Esta característica torna possível a realização de medições muito localizadas com o uso de furos de pequenos diâmetros. Normalmente os furos usinados são de 0,8; 1,6 ou 3,2mm de diâmetro, sendo

a profundidade recomendada igual ou 20% superior ao diâmetro para campos de tensões uniformes. Para campos de tensões não-uniformes ao longo da profundidade, a profundidade máxima, que permite uma quantificação segura, é de 50% do diâmetro do furo, acima desta profundidade não é mais possível avaliar corretamente a presença de gradiente de tensões [29].

Quantitativamente o método do furo apresenta ótima performance quando comparado com outras técnicas de larga utilização. A incerteza de medição do método do furo, considerando o uso em campos de tensões uniformes e emprego de técnica de medição adequada, como extensometria ou técnicas óticas, é de  $\pm 20$  MPa..

Como a formulação clássica do método do furo considera a existência de campos de tensões residuais uniformes, nos casos em que a tensão varia com a profundidade, a tensão calculada é sempre menor do que a tensão máxima. Para avaliar a uniformidade da tensão ao longo da espessura e garantir o uso correto dos coeficientes de calibração, é recomendado pela norma da ASTM E837-92 [41], realizar a furação de maneira incremental, registrando as deformações ou deslocamentos e as respectivas profundidades. A análise dos dados pode ser feita plotando-se um gráfico com os dados e verificando se a curva se enquadra dentro de uma faixa de tolerância apresentada pela norma (Figura 4.5.) ou calculando para cada incremento na profundidade, as tensões principais equivalentes para um campo uniforme.

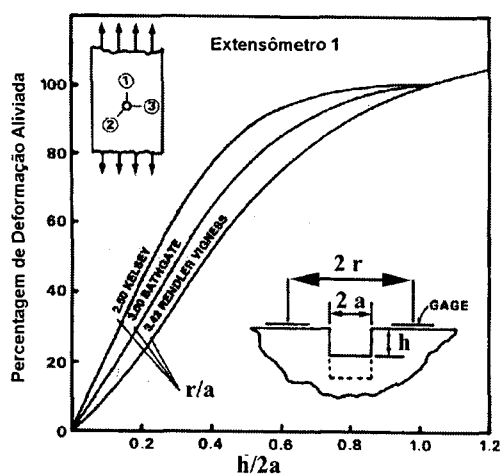


Figura 4.5. Deformação aliviada no raio de amostragem adimensional  $r/a$  versus relação entre profundidade/diâmetro do furo  $h/2a$  segundo diversos autores, para o caso de tensão uniforme ao longo da profundidade (deformações normalizadas em 100% em  $h/2a=1$ ) [29] - Faixa de tolerância para tensão uniforme -

## 4.5. FONTES DE ERROS

Em qualquer operação de medição sempre existem erros. Como regra, suas magnitudes dependem das características da técnica experimental em si, bem como dos diversos parâmetros envolvidos. No método do furo existe um grande número de parâmetros envolvidos: diâmetro e profundidade do furo, raio de amostragem, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, constantes de calibração, comprimento de onda da luz do laser, digitalização, processamento das imagens, modelo analítico e numérico, cujas contribuições no balanço dos erros deve ser avaliada.

As principais fontes de erros do método do furo podem ser classificadas segundo sua origem: a) técnica de furação, b) geometria do furo, c) medição da geometria do furo usinado, d) geometria da peça medida, e) campos de tensões, f) constantes de calibração do furo cego, g) medição dos deslocamentos ou deformações decorrentes do alívio de tensões e h) condições ambientais. Na Figura 4.6. as diversas fontes de erros são detalhadas na forma de tabela quanto a origem, causa, efeito e valor admissível [42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]. A intenção da tabela é de sintetizar as informações, evitando longos tratados. As tensões introduzidas pelo processo de furação e os aspectos relacionados à geometria do furo, são analisados com mais detalhes no próximo capítulo.

Conforme indicado na norma ASTM, a técnica do furo cego para medição na profundidade total, só apresenta bons resultados quando o campo de tensão é uniforme em magnitude e direção ao longo da profundidade. Quando a tensão residual varia com a profundidade, a incerteza de medição aumenta e as tensões uniformes "equivalentes" calculadas para profundidades parciais, usando um processo de furação incremental, dão uma informação apenas qualitativa, mostrando a tendência da distribuição de tensão com a profundidade. O primeiro incremento em profundidade é o que melhor se aproxima do valor médio para tensão nesta camada. O segundo e subsequentes incrementos são menos indicados para uma avaliação quantitativa devido ao fato da deformação ou deslocamento acumulado para qualquer profundidade ser afetado de uma forma complexa pelas tensões aliviadas a profundidades menores.

O magnitude do campo de tensões residuais sofre a influência de todas as fontes de erros citadas porém, as tensões introduzidas durante a usinagem, a plastificação da borda do furo e a presença de gradientes de tensão são as mais críticas. Já o valor determinado pelo método do furo, para o ângulo das tensões principais com a direção medida, é extremamente sensível a todas as pequenas variações dos valores experimentais. Estas pequenas variações dos valores experimentais podem ser causadas por qualquer fonte de erros, felizmente na maioria dos casos a informação mais valiosa são os valores das tensões principais.

PRINCIPAIS FONTES DE ERROS NA TÉCNICA DO FURO E INTERFERÔMETRO RADIAL						
ORIGEM	ESPECIFICAÇÃO		CAUSA	EFEITO	VALOR RECOMENDADO	COMENTÁRIO
TÉCNICA DE FURAÇÃO	Tensões induzidas na furação		processo de furação inadequado. Depende do material e ferramenta.	tensões residuais induzidas superpostas as existentes.	< 3% da tensão residual a medir.	O erro grosseiro é perceptível pelo som e visualmente
	Efeito da Temperatura		aquecimento devido processo de furação	deformação aparente	esperar alguns segundos antes de medir	depende do material
	Excentricidade do furo com relação ao centro óptico do espelho cônico		excentricidade da guia de furação	3,5% por 0,5mm de erro de alinhamento, a orientação é pouco afetada	< 0,05mm	amostragem do sinal considerando o centro óptico.
GEOMETRIA DO FURO	Variação na forma do furo		folgas radiais do dispositivo de furação e vibração da fresa	0,02mm de erro na circularidade.: 1%D= 2%erro 2%D=4,5%erro	erro de circularidade < 0,01mm	a orientação das direções principais não é afetada
	Ortogonalidade		desalinhamento do dispositivo de furação	alívio de tensões complexo, 17% erro para +/-15°	<+/-2,5° (erro de 5% nas tensões)	
MEDIÇÃO DA GEOMETRIA DO FURO	medição do diâmetro do furo		variação no diâmetros das fresas e dificuldade de medição devido rebarbas	0,02mm de incerteza no diâmetro.: 1%D= 2% erro 2%D= 4,5% erro	< 0,01mm	a orientação das direções principais não é afetada
	medição da profundidade do furo		folgas axiais do dispositivo de furação e incerteza do sistema de medição	10% a 30% de erro por 10% de erro na determinação da profundidade e h/D=1.2	menor do que 1.2 x diâmetro do furo e incremento mínimo >0.05mm	para relações h/D menores do que 1.2 o erro introduzido pode ser maior
CONDIÇÕES DE CONTORNO	Posição do Ponto de Medição		distância do ponto de medição da borda do componente	efeito de borda na distribuição de tensão	4 X diâmetro do furo	
			distância entre pontos de medição adjacentes	modificação do campo de tensão a ser medido	mínimo 6X, aconselhável 8 X diâmetro do furo	
	Superfície Medida		forma do componente diferente da plana	perda de validade da formulação	raio de curvatura maior do que 5 X diâmetro	
EFEITO DO ESTADO DE TENSÃO	Plastificação da Borda do Furo e do Fundo do Furo		tensão próxima da tensão de escoamento, perda de validade da formulação linear	3% erro para Tensão residual = 0,80 da tensão de escoamento	para furo cego pode-se chegar a valores < 70% tensão escoamento	
	Gradiente de Tensão		gradiente de tensão no plano	valor médio aproximado é obtido	negligível quando a variação é = D	existe formulação específica
			gradiente de tensão ao longo da profundidade	tensão calculada é menor do que a tensão máxima	realizar furação incremental	bons resultados até prof.=50%D
ERROS DAS CONSTANTES DE CALIBRAÇÃO	Coeficientes de Calibração dependentes do Material		Erros devido a variação dos coeficientes com a variação do coeficiente de Poisson	na faixa de $0,28 < \nu < 0,33$ tem-se erro de 2% para h/D >0,5 e 1% para h/D<1	para menor incerteza usar h/D=1,2	erros podem ser anulados com a correção das ctes considerando o coef. de Poisson
	Sensibilidade Transversal da Roseta extensométrica		modelos de rosetas fora do padrão	uso errado dos coeficientes	usar rosetas padronizadas	necessário calibração experimental
	Dependência com Profundidade		para furo cego solução de Kirsch é apenas aproximação	necessidade de usar valores tabelados (solução de FEM)	obedecer recomendação da ASTM	
	Geometria do Material	espessura	espessura do componente muito fina	não univocidade do campo de tensão calculado, dependendo da espessura	espessura maior do que diâmetro do furo (furo passante)	mínimo de 6,5mm para utilizar ctes normais obtidas p/ furo cego [86,87].
		largura	desprezo da largura do componente	não univocidade do campo de tensão calculado, dependendo da espessura	maior do que 7X diâmetro do furo	
	Material	Módulo Elasticidade	Desconhecimento do valor exato do E	10% erro em E = 10% erro na tensão residual	usar E mais correto para cada material	
		Coeficiente de Poisson	Desconhecimento do valor exato	10% erro em $\nu = 2,5\%$ erro na tensão residual	usar $\nu$ mais correto para cada material	não afeta orientação das dir. principais
	Erro de interpolação		amostragem diferente da recomendada	erros de quantificação	2,5 a 5 X o diâmetro	
FORMULAÇÃO	Formulação Extensômetro de Resistência PUNTUAL		desprezo das dimensões dos ER	20%erro nas tensões	usar rosetas padronizadas pela ASTM837-85	deve-se empregar formulação para ER finito e FEM
ERROS DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO	Extensômetros de Resistência		erros dos extensômetros de resistência + erros na instrumentação	+/- 1,5% para ótimos instrumentos e ER	+/-1% fator sensibilidade +/-1% para erros da instrumentação	
	Holografia Eletrônica	erro de amostragem		+/- 5% no máximo	usar amostragem com pequenas diferenças entre anéis	o método dos harmônicos é indicado para isto
		erro causado pelo filtro		+/- 10%	usar filtro suave	
		erros do sistema de medição completo		+/- 10MPa de erro para zero de tensão residual, OU +/-15% erro	usar furo de no mínimo 0,8mm de diâmetro	

Figura 4.6 Tabela de fontes de erros para a técnica do furo.

#### 4.6. MÉTODO DO FURO COM EXTENSÔMETROS

Praticidade e flexibilidade tornaram a extensometria a técnica mais utilizada para medição de tensões residuais. Normalmente emprega extensômetros de resistência do tipo roseta extensométrica. O procedimento é normalizado e pode ser aplicado rotineiramente, por técnico especializado, em peças de qualquer tamanho e forma, no laboratório ou no campo, desde que a superfície seja regular e acessível e sejam tomados alguns cuidados com possíveis fontes de erros [29,35,49].

A roseta é capaz de medir a deformação radial, causada pelo alívio de tensões provocado pela usinagem de um furo até uma profundidade aproximadamente igual a seu diâmetro. Comercialmente encontram-se dois tipos de rosetas, uma em que os extensômetros são bem distribuídos ao redor do furo (extensômetros 1, 2 e 3 da Figura 4.7.) e outra em que os três extensômetros ocupam um mesmo lado (extensômetros 1, 2, 3 da Figura 4.8). Este último é indicado para posições de medição próximas a obstáculos. Nos dois modelos os extensômetros ficam com o centro situado a uma distância “ $r$ ” do centro do furo e dispostos numa configuração com um incremento angular de  $45^\circ$  entre eles. Para a instalação das rosetas é exigido que a localização seja acessível para a usinagem precisa do furo e a colagem das rosetas. A área mínima necessária para a colagem das rosetas, incluindo os terminais, deve ser maior do que  $10 \times 10 \text{ mm}$ . A norma padrão da ASTM-837-85 especifica que a região de amostragem para o malha do extensômetro deve se situar a uma distância do furo dada pela seguinte relação:  $2.5 < r/a < 3.4$ , onde  $r$  é o raio médio do anel onde se situam os centros dos extensômetros e  $2a$  é o diâmetro do furo, ou seja,  $r =$  raio de amostragem e  $a =$  raio do furo.

Existem poucos instrumentos comerciais dedicados a furação e alinhamento do furo com as rosetas extensométricas. O tipo de guia de furação mais adotado é baseado no modelo apresentado na Figura 4.9. Este tipo de guia facilita o alinhamento do furo com a roseta,

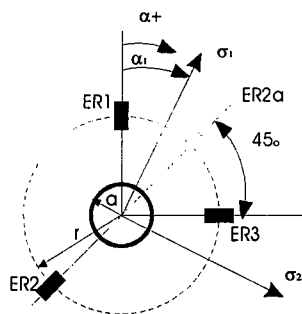


Figura 4.7. Roseta extensométrica comum

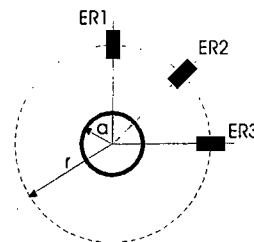


Figura 4.8. Roseta extensométrica especial para cantos

utilizando um microscópio de medição, um sistema de posicionamento XY, um sistema de nivelamento, e para executar o furo, pode operar com uma de turbina de altíssima rotação ou um sistema de baixa rotação [50]. Também pode ser encontrado no mercado um sistema onde a furadeira é manual e cada roseta possui uma bucha guia (Figura 4.10.) [51]. No entanto, esta solução aumenta o custo das rosetas e a técnica de furação manual aumenta a incerteza do método de medição. Outro tipo de dispositivo, utiliza a usinagem por jato abrasivo com o auxílio de um sistema de posicionamento e de um microscópio de medição (Figura 4.11) [52].

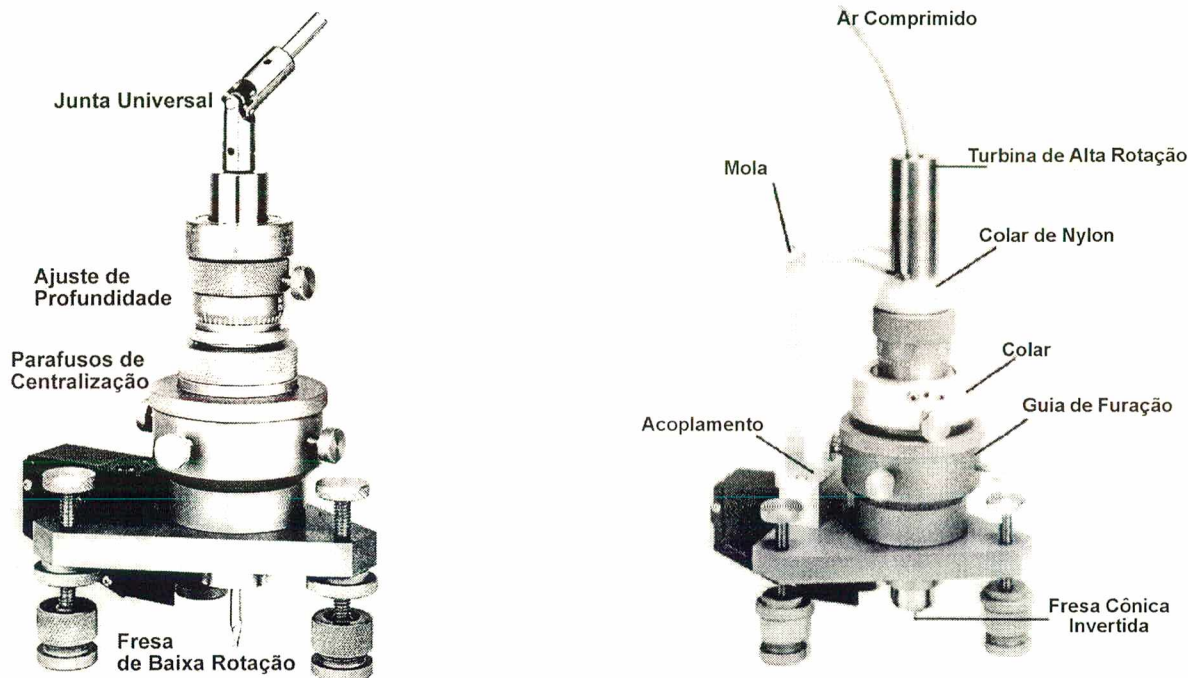


Figura 4.9. Guia de furação com furadeira de baixa rotação e com furadeira de alta rotação.

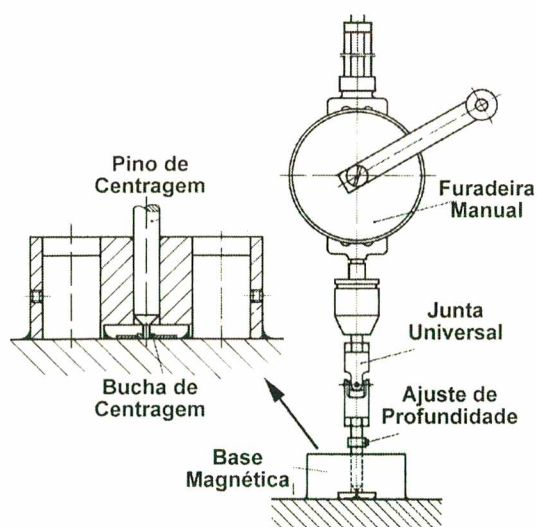


Figura 4.10. Dispositivo de furação manual

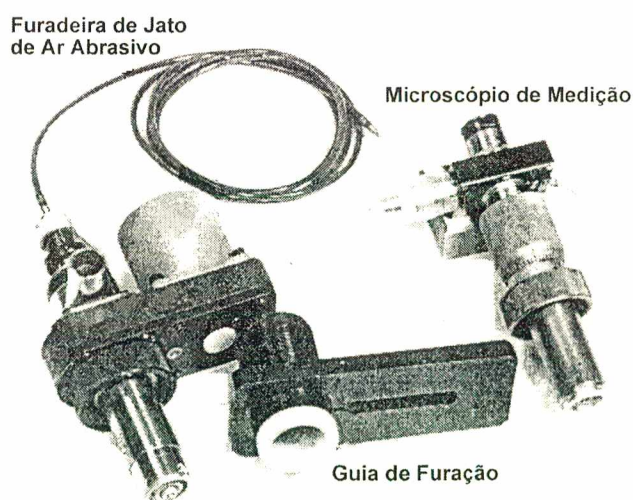


Figura 4.11. Dispositivo de furação com jato abrasivo



4.6.1. FORMULAÇÃO ANALÍTICA

A formulação analítica para extensometria baseia-se na medição de deformações radiais ao redor do furo a ser realizado. A norma ASTM "Standard Test Method E 837-92" explica detalhadamente o procedimento prático para os cálculos numéricos. O procedimento da técnica de medição é apresentado na Figura 4.11.

A determinação do campo de tensão residual é dada pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \mp \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \tag{4.13}$$

onde:

A,B = constantes de calibração

$\varepsilon_{1,2,3}$  = deformações dos três extensômetros da roseta segundo Figuras 4.7 e 4.8

A orientação das direções principais podem ser obtidas de:

$$\tan(\alpha) = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) - \sqrt{(2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1))^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)^2}}{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)} \tag{4.14}$$

onde  $\alpha$  é o ângulo entre a tensão máxima e o eixo da roseta número 1. Para roseta comercial, cujos extensômetros são orientados segundo o sentido anti-horário, o ângulo é  $\beta=(\alpha+90)$ .

Os coeficientes A e B devem considerar a implementação física dos extensômetros, i. é., a atenuação das deformações devido ao fato do extensômetro ter uma área finita, amostrando um sinal médio na área que ocupa, e serem levemente sensíveis à deformação tangencial além da radial. Uma forma eficiente de obtê-los, é preferencialmente, através de calibração experimental ou pela utilização de coeficientes, independentes do material, desenvolvidos para alguns modelos de rosetas comerciais e encontrados na forma de tabelas ou gráficos [29, 41].

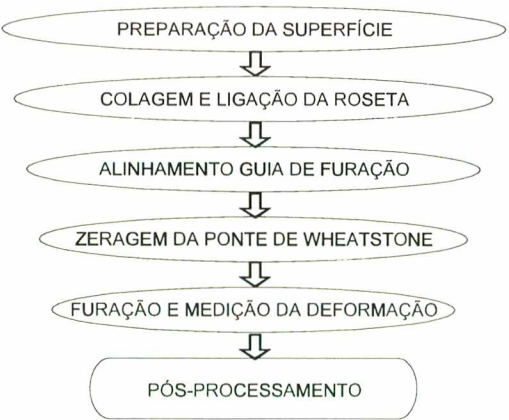


Figura 4.11. Fluxograma de medição de tensões residuais com extensometria e o método do furo.

O procedimento de calibração experimental é mostrado na Figura 4.12. O pós processamento da calibração envolve o cálculo de A e B baseados na seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{C1} &= \varepsilon_1'' - \varepsilon_1' \\ \varepsilon_{C3} &= \varepsilon_3'' - \varepsilon_3' \\ \overline{A} &= \frac{\varepsilon_{C1} + \varepsilon_{C3}}{2\sigma_c} \\ \overline{B} &= \frac{\varepsilon_{C1} - \varepsilon_{C3}}{2\sigma_c} \end{aligned} \tag{4.15}$$

Deve-se lembrar que os valores de A e B determinados desta forma só são válidos para: o mesmo material, a mesma roseta, o mesmo diâmetro do furo e a mesma profundidade do furo, além das condições básicas de uniformidade do campo de tensões, tanto no plano, como ao longo da profundidade.

Com o emprego de tabelas ou gráficos, fornecidos para as rosetas comerciais (Figura 4.13), obtém-se os coeficientes a e b e as constantes A e B podem ser calculadas por:

$$\begin{aligned} \overline{A} &= -\frac{1+\nu}{2E} \overline{a} \\ \overline{B} &= -\frac{1}{2E} \overline{b} \end{aligned} \tag{4.16}$$

onde:  $\overline{a}, \overline{b}$  são valores tabelados praticamente independentes do material.

Para o cálculo das tensões equivalentes ao longo da profundidade, utilizadas na verificação da uniformidade do campo de tensões, são utilizadas tabelas ou gráficos (Figura 4.14.), construídos a partir de análises por elementos finitos, considerando a relação profundidade parcial/diâmetro do furo ( $h/2a$ ). Deve ser lembrado que, também neste caso, cada modelo de extensômetro necessita de tabela ou gráfico dedicado e a não observância deste fato conduz a erros. Os valores  $\overline{A}, \overline{B}$  são calculados pelas mesmas relações da equação 16.

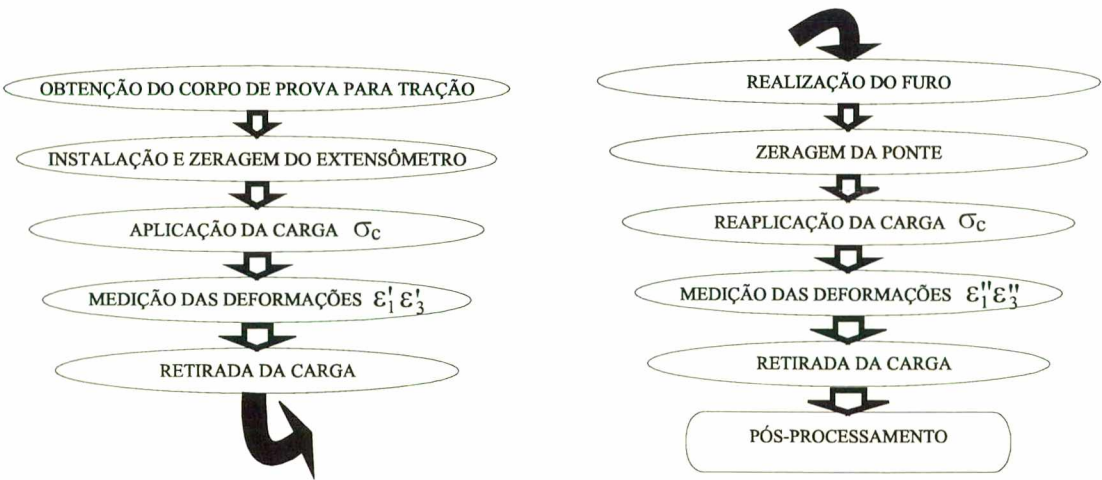


Figura 4.12. Procedimento experimental para obtenção das constantes de calibração.



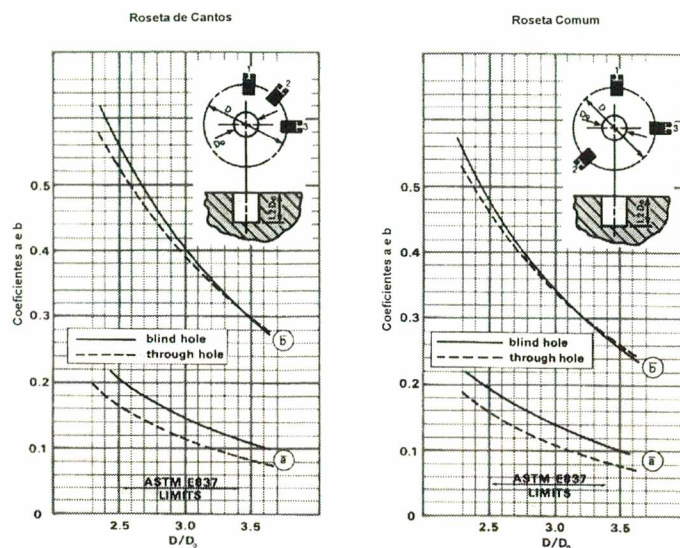


Figura 4.13. Obtenção das constantes de calibração para roseta de uso com o método do furo respeitando a relação diâmetro média da roseta/ diâmetro do furo [50].

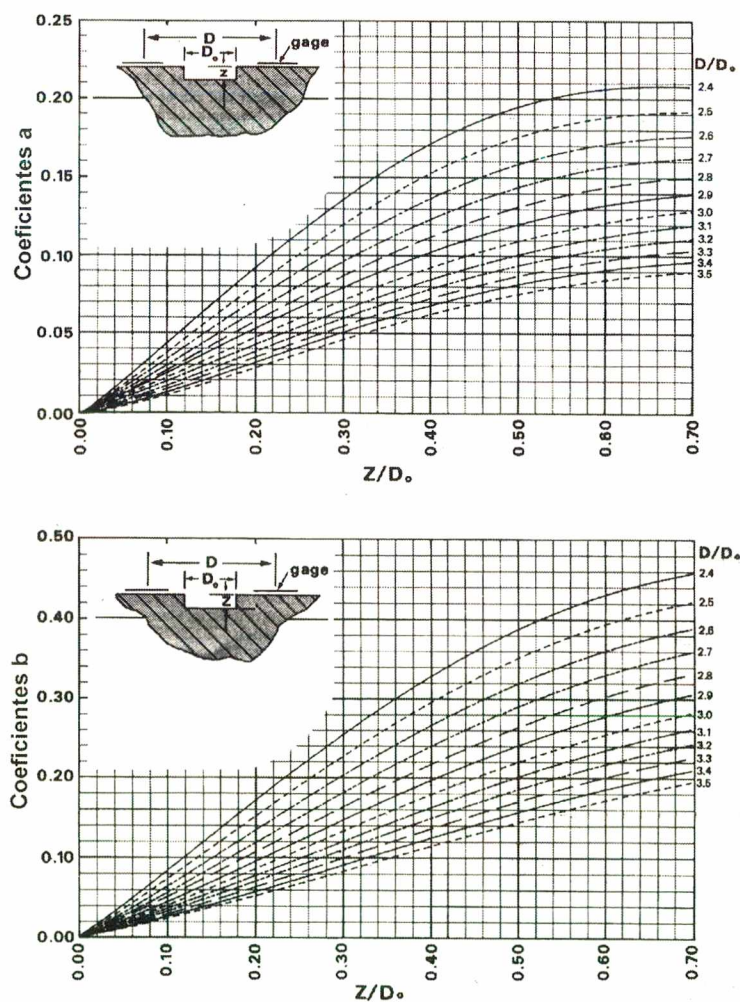


Figura 4.14. Obtenção dos coeficientes a e b em função da relação adimensional entre a profundidade e o diâmetro do furo e a relação diâmetro de amostragem/ diâmetro do furo [29].

#### 4.6.2. FONTES DE ERROS E LIMITAÇÕES COM EXTENSÔMETROS

As principais fontes de erros específicas do método do furo com rosetas extensométricas são: o desalinhamento do furo em relação ao centro da roseta (pequenos desalinhamentos = 0,025mm, para um diâmetro de 1,6 mm, podem causar grandes erros na medição = 3%); existência de sensibilidade transversal além da sensibilidade segundo o eixo longitudinal; introdução de novas tensões residuais nas operações de limpeza da superfície e a retirada da camada de interesse pela operação de preparação da superfície.

Muitos destes erros podem ser evitados e alguns podem ser corrigidos através de algoritmos de tratamento dos dados, calibrações e com a utilização de instrumentos adequados para medir o desequilíbrio da ponte de Wheatstone. No entanto existem outras dificuldades e fontes de erros na aplicação da extensometria, em conjunto com o método do furo, que devem ser mencionadas: o tempo de preparação, o custo, a instalação e a dimensão mínima da roseta.

##### a) Tempo de Preparação

A correta instalação de extensômetros de resistência, na superfície a ser medida, requer criteriosa limpeza e preparação, colagens e soldagens, consumindo um tempo que pode ultrapassar de uma hora e ainda existe a possibilidade de um mal funcionamento de uma roseta requerendo sua remoção e reinstalação. Finalmente, o tempo requerido para o alinhamento do dispositivo de furação, a furação propriamente dita, a tomada dos dados e processamento, também pode ser grande, da ordem de uma hora adicional na maioria dos casos.

##### b) Custo

O custo dos extensômetros está relacionado à alta sensibilidade necessária na medição das pequenas deformações elásticas provenientes do alívio das tensões residuais. Estes extensômetros geralmente possuem marcas que facilitam o alinhamento da roseta na superfície da peça e também marcas que ajudam na centragem do dispositivo de furação sobre a roseta (Figura 4.15.).

##### c) Instalação

A principal fonte de erro na instalação das rosetas está na sua colagem, portanto fortemente ligada com a experiência e cuidados do operador. As condições em que a limpeza e preparação da superfície da peça é efetuada, também, exercem influência considerável.

A principal dificuldade se deve ao fato de que depois de realizada a montagem dos extensômetros de resistência não existe nenhuma forma totalmente segura de verificar se a operação foi bem realizada, i.é., não há forma de garantir que a deformação que ocorre no material seja a mesma acusada pelos extensômetros de resistência. Para evitar a presença de erros



grosseiros oriundos da colagem aconselha-se realizar o pressionamento da área sensível dos extensômetros com uma borracha e verificar se a alteração no equilíbrio da ponte de Wheatstone é pequena. Também é interessante o uso de aparelhos de teste específicos para extensometria.

**d). Dimensões**

A dimensão mínima da roseta é limitada fisicamente pela posição das grades de resistência, que se situam a uma certa distância do furo. O nível de deformação varia a medida que se afasta da borda do furo e o resultado é sempre representativo do valor médio da área abrangida pelo extensômetro (Figura 4.16.). Como consequência, o método com extensômetros tem sensibilidade limitada, sendo aconselhável o uso de furos de 1,6 ou 3,2 mm de diâmetro. Com a utilização de furo com 0,8mm de diâmetro, ou menores, os efeitos causados pelo alívio de tensões diminuem e as deformações medidas são muito pequenas e estão mais fortemente expostas às influências de outras fontes de erros. Desta forma, pode-se afirmar que a roseta extensométrica apresenta limitações para a medição de tensões residuais localizadas com furos de 0,8 mm de diâmetro ou menos, principalmente em peças que apresentam grandes gradientes de tensão.

Embasado nos fatos apresentados pode-se dizer que o emprego de extensômetros de resistência para medição de tensões residuais pode demandar muito tempo e ter custo elevado para a inspeção em massa na indústria. Já nos laboratórios e em projetos de pesquisa, a extensometria continua propícia à medição de tensões residuais, desde que respeitados os seus limites.

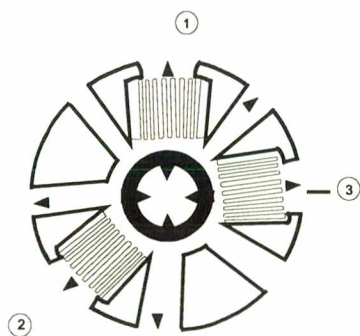


Figura 4.15. Roseta Típica

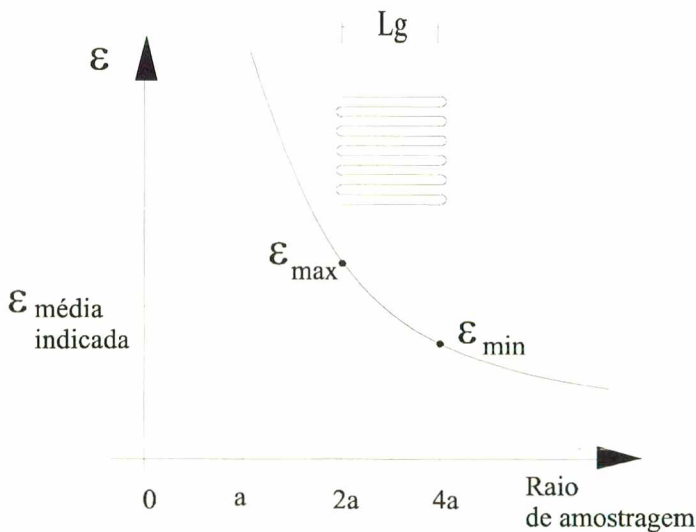


Figura 4.16. Relação entre a deformação real e a indicada

## 4.7. MÉTODO DO FURO APLICADO COM TÉCNICAS ÓPTICAS

Algumas das limitações apresentadas com o uso de extensômetros de resistência podem ser minimizadas pelo uso de técnicas ópticas devido a característica de medição sem contato. Alguns aspectos positivos das técnicas ópticas são mais evidentes em situações não convencionais para a extensometria como: a) nos casos em que as peças são muito pequenas, b) na obtenção do valor de tensões residuais localizadas e c) em situações normais onde são desejados resultados com menores incertezas. Diversas técnicas ópticas de medição têm sido empregadas como por exemplo: fotoelasticidade por reflexão, holografia interferométrica, holografia eletrônica (HE), holografia “Shearing” eletrônica, Interferometria Moiré. A seguir serão, resumidamente, apresentadas as características, princípios, vantagens e desvantagens mais relevantes destas técnicas.

### 4.7.1. FOTOELASTICIDADE

A aplicação de fotoelasticidade para medir tensões residuais parte do princípio de que muitos materiais transparentes, os quais são opticamente isotrópicos, se tornam opticamente anisotrópicos quando tensionados, exibindo franjas de isotensão [53]. Este efeito normalmente persiste enquanto o carregamento é mantido, mas se anula instantaneamente após a remoção do carregamento. Desta forma, pelo uso da lei óptica de tensão, o valor das tensões residuais aliviadas pode ser medido através da análise das franjas originadas ao redor do furo. Pela formulação da fotoelasticidade mede-se a diferença entre as tensões principais pela seguinte

$$\text{equação: } \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\text{OF} \cdot f_\sigma}{h} \quad (4.17)$$

onde: OF = ordem de franja

h = espessura da peça

$f_\sigma$  = coeficiente de tensão óptico

A determinação das tensões residuais por fotoelasticidade tem aplicação em polímeros transparentes onde diversas geometrias podem ser ensaiadas de forma direta sem realização de furo na peça. Já em componentes opacos é necessário depositar uma película de filme fotoelástico sobre a superfície do material. Com este método as tensões residuais podem ser determinadas a partir da leitura da ordem de franja de tensão após a execução do furo.

Apesar da técnica permitir a automatização com o uso de câmeras, placas de processamento de imagens e técnicas de deslocamento de fase, sua aplicação industrial exigiria a colagem de película fotoelástica para muitos casos onde os materiais sob análise são opacos. Quando se deseja conhecer o valor de tensão de forma localizada, imperfeições na técnica de deposição do filme fotoelástico se tornam muito críticas, podendo mesmo inviabilizar seu uso.



#### 4.7.2. INTERFEROMETRIA MOIRÉ

Interferometria Moiré é uma técnica consagrada, para medições de deformações no plano a partir da medição dos respectivos campos de deslocamentos. A técnica apresenta elevada sensibilidade, excelente contraste das franjas, e permite a medição de grandes deslocamentos [37, 54, 55, 56].

A técnica baseia-se na colagem de uma grade regular de linhas cruzadas sobre a superfície do corpo a medir, da ordem de até 1200 linhas/mm, nas direções x e y. Duas fontes de iluminação simétricas e coerentes produzem franjas horizontais devido a interferência construtiva e destrutiva. Esta grade de referência, originada da iluminação, interage com o conjunto de linhas da grade do espécime formando um padrão de franjas de moiré. Nesta condição são detectados deslocamentos verticais. Similarmente através de uma grade de referência criada por feixes horizontais, conjunto de linhas verticais de interferência, combinada com as linhas verticais da grade do objeto, fornecem o campo de deslocamentos horizontais.

Após a instalação da grade, deve ser realizado o furo para provocar o alívio de tensões na peça, o que resulta na deformação da grade. A grade deformada é então iluminada pelos dois feixes de laser colimados. A grade deformada e a grade criada pelos feixes de laser se combinam e geram um padrão de franjas devido a componente do deslocamento, no plano, na direção perpendicular às linhas da grade sob investigação.

A tensão residual desconhecida é então determinada em magnitude e direção a partir do campo de deslocamentos medido. A sensibilidade ao deslocamento no plano do método de interferometria Moiré é alta suficiente para medir os deslocamentos decorrentes do alívio das tensões residuais, ou seja, para uma grade de 1.200 linhas/mm tem-se uma ordem de franja equivalente à  $0,417 \mu\text{m}$ . As grades de moiré podem ser lineares, cruzadas ou do tipo roseta, possibilitando medições em três direções.

A técnica da interferometria Moiré também permite a automatização da medição com o uso de câmera de vídeo e técnicas de deslocamento de fase, o que aumenta a resolução para  $0,04\mu\text{m}$ , no entanto a aplicação de uma grade sobre a peça consome tempo e limita o seu uso à regiões favoráveis quanto à instalação.

#### 4.7.3. HOLOGRAFIA INTERFEROMÉTRICA

A holografia interferométrica pode ser usada para determinar com elevada sensibilidade os campos de deslocamentos no plano ou fora do plano provocado pelo alívio das tensões residuais pela usinagem de um furo. A principal diferença da técnica de holografia, com relação a técnica de extensometria, é no tipo de sinal medido, ao invés de variação de resistência são analisados campos de alteração de fase da luz, mapas de franjas, originados do deslocamento da superfície ao redor do furo [57, 58]. O campo de tensões residuais pode ser determinado a partir dos deslocamentos medidos em duas ou três direções de iluminação de forma análoga à que ocorre com o emprego de rosetas extensométricas.

Na holografia a grandeza responsável pelo sinal é a luz coerente e monocromática do laser. São necessárias duas exposições de luz sobre um filme fotográfico de alta resolução para produzir um mapa de franjas com holografia interferométrica, a primeira é feita na peça com tensões residuais e a segunda é feita após a realização de alívio das tensões pelo furo.

A principal vantagem da técnica é a sua alta sensibilidade. No entanto sua aplicação com o método do furo exige pessoal muito capacitado. Outro fator importante é que a técnica dificilmente pode ser levada para o campo devido a configuração óptica empregada e a sua sensibilidade às instabilidades ambientais.

As primeiras aplicações de holografia interferométrica na medição de tensões residuais datam de 1977. Em 1986 o trabalho de Nelson e McCrickerd apresentou a utilização de um simples holograma para analisar o campo de deslocamento completo ao redor de um furo cego. Nelson e Makino desenvolveram uma técnica para quantificar as tensões e as direções principais de um campo de tensões biaxial. A técnica de Nelson e Makino não necessita de conhecimento prévio das direções principais e o método analítico para extrair os dados dos padrões de franjas trabalha com uma mistura de deslocamentos no plano e fora do plano.

Uma contribuição dos trabalhos de Nelson e Makino para as técnicas ópticas em geral é a análise tridimensional do campo de deslocamentos feita através de técnica de elementos finitos. A análise de FEM fornece coeficientes adimensionais que permitem o cálculo das tensões residuais em materiais com diferentes módulos de elasticidade, utilizando diferentes diâmetros de furos cegos e também a análise de gradientes de tensões ao longo da profundidade. Trabalhos semelhantes foram realizados previamente por Schaejer e outros autores direcionados a determinação de coeficientes adimensionais para aplicação com a técnica do furo cego e extensometria.

Nelson e Makino calculam as tensões residuais pela contagem das franjas de um holograma da região ao redor de um furo cego. O método de obtenção dos dados é baseado na interpretação dos padrões de franjas como curvas de níveis de uma superfície tridimensional



expressada como uma função ordem de franja. A técnica de contagem das franjas atribui um sinal para cada franja baseado na derivada local da função ordem de franja de forma a eliminar a influência dos deslocamentos fora do plano. Os valores das tensões e direções principais são obtidos através da solução de um sistema de três equações com três incógnitas. Testes da técnica foram realizados em ligas de alumínio 7075 e com aço inoxidável com carregamentos uniaxiais e biaxiais.

A grande dificuldade na aplicação do método de holografia interferométrica, apesar das contribuições de Nelson e Makino, continuam sendo no procedimento de obtenção dos dados a partir de mapas de franjas, na falta de aplicação de processamento de imagem para automação do processo, na falta de aplicação de técnicas de deslocamento de fase para aumentar a resolução do sinal, na impossibilidade de utilização em ambiente fora do laboratório devido a sensibilidade à vibrações e devido ao arranjo óptico para a utilização de filmes holográficos comuns ou filmes termoplásticos. Enfim pode-se afirmar que o trabalho atual em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina é a mais nova contribuição na área de holografia utilizando para isto a técnica de holografia eletrônica vista a seguir.

#### **4.7.4. HOLOGRAFIA ELETRÔNICA -HE-**

No trabalho em desenvolvimento a técnica adotada é a holografia eletrônica - HE - ou também conhecida como ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry). É uma técnica mais prática do que a holografia interferométrica clássica devido à substituição do processamento fotoquímico do filme de alta resolução por processamento do sinal digitalizado por uma câmera de TV [59,60].

A subtração de dois padrões de speckles interferométricos, um na configuração antes do furo e outro após a furação, origina um mapa em que a forma e a quantidade de franjas dependem da configuração óptica utilizada, dos deslocamentos da superfície decorrentes do alívio de tensões provocado pelo furo e da direção das tensões principais com relação à montagem óptica.

O processamento dos sinais da técnica de HE pode ser efetuado através do chamado “mapa de fases”. O mapa de fases permite obter maior resolução nas informações sobre o campo de deslocamentos. Para isto, o mapa de fases passa por certos tratamentos de imagens que possibilitam retirar a informação de todo o campo de deslocamentos da superfície, segundo uma determinada direção, a menos da superfície muito próxima da borda do furo. A partir do campo de deslocamentos ao redor do furo pode-se obter o campo de tensões residuais. Uma descrição mais detalhada sobre a técnica de deslocamento de fases que origina os mapas de fases será apresentada posteriormente.

Como a técnica de HE utiliza uma câmera de vídeo para registrar o sinal e placas

eletrônicas para o processamento de imagens, a automação do ensaio não é muito difícil e isto garante a possibilidade de criar uma metodologia de medição de tensões residuais onde não é exigido grande capacitação do usuário. A técnica apresenta grande potencial para aplicação em ambiente industrial pelo fato da câmera capturar várias imagens por segundo e a configuração óptica possibilitar o emprego de técnicas passivas ou ativas de estabilização de imagens. Estas características permitem em parte o relaxamento de requisitos de isolamento quanto à vibração [61].

O método do furo combinado com a técnica de HE viabiliza a medição de tensões residuais localizadas. A medição de tensões residuais localizadas exige a análise de regiões muito pequenas, normalmente regiões menores do que 5X5 mm onde o diâmetro do furo deve ser menor do que 1 mm. Isto pode facilmente ser obtido utilizando lentes de aproximação (macro) para a câmera de vídeo e técnica de furação adequada.

#### **4.7.5. HOLOGRAFIA SHEARING ELETRÔNICA - ESSPI**

Assim como HE, a Holografia Shearing Eletrônica (ESSPI - Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry) é uma técnica interferométrica assistida por computador cujo sinal é obtido pelos padrões de speckles aleatórios e cujas franjas são geradas da subtração digital do padrão de speckles interferométricos deformado do indeformado. A diferença fundamental está na informação trazida pelos padrões de franja. Na HE as franjas representam deslocamentos, enquanto em ESSPI elas representam derivadas do deslocamento, ou seja, deformações [59, 60].

A ESSPI permite medir diretamente as deformações utilizando uma câmera de vídeo e placas de processamento de imagem onde são obtidos e processados os mapas de franjas criados na vizinhança do furo. As tensões residuais podem ser calculadas a partir das equações de deformação apresentadas no capítulo 3.

Em ESSPI, deslocamentos de corpo rígido não produzem deformação e portanto não geram franjas que se sobrepõem às franjas úteis, como ocorre com HE, porém ambas possuem tolerância limitada ao deslocamento do corpo rígido. O fato se deve a perda de correlação dos speckles com a deterioração da visibilidade das franjas. A principal desvantagem de ESSPI com relação a HE é a necessidade de utilização de técnicas mais complexas de deslocamento de fase. Deve ainda ser mencionado que a interpretação das franjas de ESSPI não é tão trivial. As franjas resultam da combinação das derivadas das componentes no plano e fora do plano. A separação das deformações requer a combinação de múltiplas imagens tomadas com ângulos de iluminação diferentes.



## CAPÍTULO 5

# PROCESSO DE EXECUÇÃO DO FURO

---

Parte do desempenho global do método do furo cego está relacionado diretamente à controlabilidade da técnica de furação. Pode-se até afirmar que a operação mais crítica do método do furo cego é justamente a execução do furo [62,63]. Os desvios das características idealizadas do furo representam fontes de erro que podem se somar às demais.

Existe na literatura técnica uma quantidade limitada de informações acerca das condições ótimas em que furos de pequenos diâmetros, destinados ao método do furo cego, são executados. Com o objetivo de melhor compreender algumas características do processo de execução de pequenos furos por usinagem com remoção de cavaco, foi feita uma análise dos furos obtidos com ferramentas de aplicação odontológica cônicas invertidas, de diâmetro de 0,6mm, normalmente encontradas no comércio. A geometria destas fresas é propícia para o bom desempenho do método do furo [64].

### 5.1. CARACTERÍSTICAS IDEAIS DO FURO

Para o método do furo duas características são muito importantes, a qualidade da forma geométrica obtida e a não introdução de novas tensões residuais.

Nos modelos adotados no método do furo, as características geométricas dos furos são idealizadas. A solução de Kirsch considera um furo perfeitamente cilíndrico, perpendicular a superfície e passante numa placa submetida a um campo de tensões uniforme e uniaxial. Portanto, quanto mais próximo da geometria ideal for o furo introduzido nas peças, melhor será a representabilidade do modelo.

Na prática em geral, o furo pode ser não passante, existem erros de ortogonalidade, erros de cilindricidade, o processo de furação introduz novas tensões residuais e, em alguns casos, a distribuição de tensão não é uniforme ao longo da profundidade do furo (Figura 5.1.). Se o processo de furação for inadequado, podem ser introduzidas tensões residuais maiores do que as existentes originalmente. Para alguns materiais, como aço inoxidável, alumínio e cobre, este efeito é muito crítico.

Para que os modelos de cálculo possam ser aplicados, é necessário que a geometria do furo seja bem definida e conhecida. O fato do furo ser não passante é compensado através de

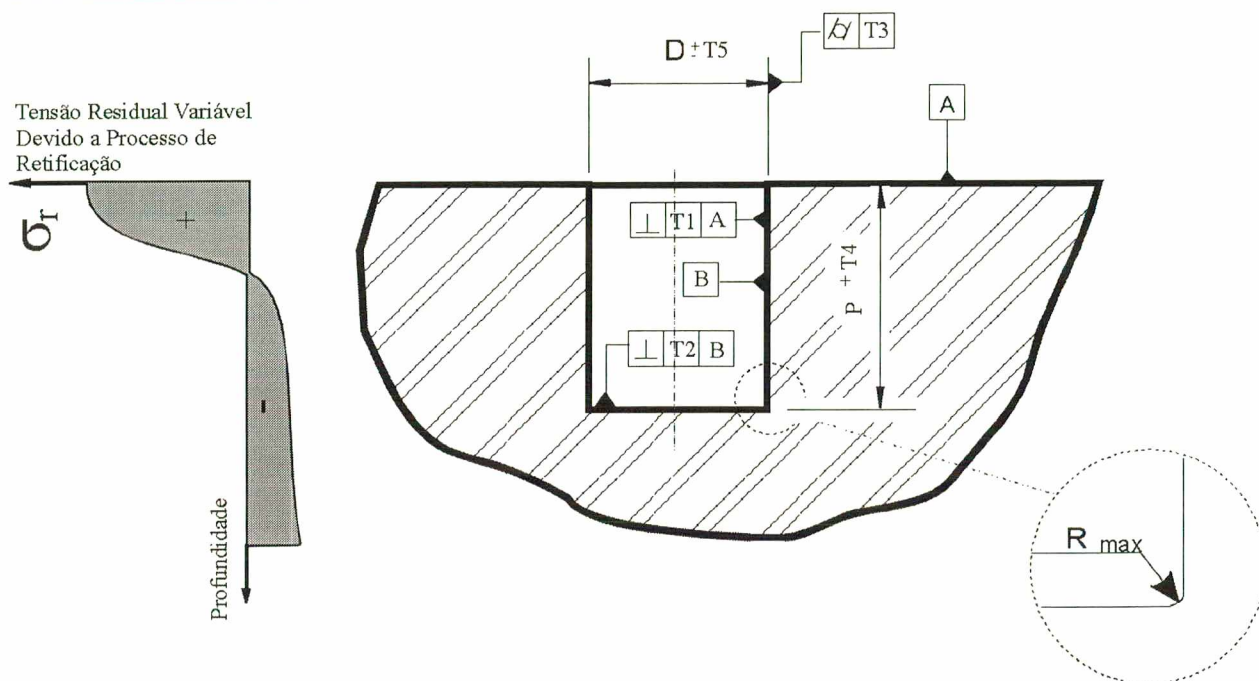


Figura 5.1. Desvio das características geométricas dos furos e dos campos de tensões.

coeficientes obtidos numericamente. Ainda assim, o furo deve ter fundo plano, cilíndrico, ser perpendicular à superfície do objeto e ter sua profundidade e diâmetro bem conhecidos.

Os requisitos de geometria, citados anteriormente, não devem ser desconsiderados pois não é viável corrigi-los, através de análise numérica, sem antes destruir a peça para identificá-los. Pode-se no entanto, desenvolver coeficientes de correção dedicados a uma geometria que possua repetibilidade, como seria o caso de cavidades, com fundo esférico, obtidas por usinagem eletroquímica.

É recomendada uma relação de 1:1 até 1,2:1 entre a profundidade e o diâmetro do furo quando este é executado num único incremento. Para o método incremental de furação, visando medir o perfil de tensões residuais não uniformes ao longo da profundidade, a profundidade deve ser controlada da forma mais precisa possível, preferencialmente com erros menores do que 0,01 mm. Pequenos erros nas profundidades, dos pequenos incrementos, podem originar grandes erros no cálculo da tensão. Devido à limitações práticas, o primeiro incremento é da ordem de 0,1mm. Para pequenos diâmetros estes efeitos são ainda mais críticos.

## 5.2. TÉCNICAS DE FURAÇÃO

A furação através de micro fresas compete com diversos sistemas de usinagem não convencionais, por exemplo, com processos de furação eletroquímicos ou térmicos, laser e feixes de elétrons. No entanto o uso de micro ferramentas é normalmente mais econômico e de aplicação genérica enquanto que os processos não convencionais ainda exigem um investimento inicial maior e possuem algumas limitações.

Quanto a exigência de introduzir o mínimo de tensões residuais, alguns processos de usinagem não convencionais são muito mais adequados do que o processo de corte com micro fresas (Figura 5.2).

Como exemplo destes processos não convencionais de usinagem, que introduzem o mínimo de tensões residuais, pode-se citar a eletroerosão brilhante "EDM", a eletroerosão química "ECM", o jato abrasivo e o feixe laser. Porém a forma dos furos obtidos em alguns processos pode ser de má qualidade e não repetitiva, como nos furos cônicos, furos com fundo arredondado e furos contendo rebarbas, enquanto que os furos obtidos com micro ferramentas apresentam geometria satisfatória e permitem um bom controle da profundidade [65]. A seguir serão apresentados alguns destes métodos.

5.2.1. USINAGEM POR JATO ABRASIVO

O método de jato abrasivo exige um equipamento capaz de direcionar um jato abrasivo controlado, contendo partículas de 50 µm de óxido de alumínio, contra à superfície a ser usinada e assim retirar pequenos cavacos [66].

Tipos de Alterações no Material	Máxima Profundidade do Efeito para a Operação de Usinagem (mm)											
	Ferramenta Cortante		Abrasiva		Química		Eletro Química		Eletroerosão 15,5 W/cm <sup>2</sup>		Feixe Laser 0,47x10 <sup>10</sup> W/cm <sup>2</sup>	
	Desb	Fino	Desb	Fino	Desb	Fino	Desb	Fino	Desb	Fino	Desb	Fino
Comum para todos materiais	Def. Plástica arrancam. mat.		Deformação Plástica		Ataque Seletivo Ataque intergranular				Microtrincas Resolidificação			
Aços Temperáveis e Inox Martensítico	microtrincas modificação da quant. martensita								Modificação da quant. Martensita			
Deformação Plástica	0.12	0.02	0.09	0.01	-		-	-	-	-	-	-
Alteração Dureza	0.5	0.025	0.25	0.04	0.08	0.025	0.05	0.036	0.203	0.025	0.127	0.025
Superfície Irregular	0.08	0.02	0.01	0.005	0.04	0.02	0.06	0.01	0.04	0.01	0.02	0.005
ZTA (*)	0.08	0.04	0.3	0.02	-	-	-	-	0.127	0.025	0.127	0.025
Rugosidade	0.006	0.002	0.002		0.006	0.006	0.003	0.0002	0.004	0.002	0.006	0.001
Tensões residuais induzidas < 10% tensão escoam.	0.4	0.15	0.3	0.01	0.025		0.0	0.0	0.08	0.05	0.015	0.005

Figura 5.2. Comparação entre diferentes processos de usinagem através de seus efeitos [5].

(\*) ZTA = Zona Termicamente Afetada

O ponto forte deste método são os níveis baixíssimos de tensões residuais introduzidas, para usinar qualquer tipo de material, com exceção de materiais muito dúcteis. No entanto, a geometria do furo resultante apresenta superfícies laterais não perpendiculares à superfície do espécime e fundo arredondado.

De uma forma geral, a usinagem com jato abrasivo não permite obter uma boa geometria para o furo assim como um controle efetivo da profundidade. Existem formas de evitar a conicidade da borda do furo [67], no entanto a técnica é inviável em se tratando de HE, pois as partículas abrasivas podem atingir a área ao redor do furo, modificando sua textura e o correspondente padrão de “speckle”.

### 5.2.2. USINAGEM ELETROQUÍMICA "ECM"

A técnica de ECM (Electrical Chemical Machining) é baseada na corrosão química catalizada pela passagem de uma corrente elétrica. O método pode ser implementado para a aplicação com o método do furo utilizando capilares de vidro para direcionar o ácido na região do furo e fio de platina para conduzir a eletricidade.

A usinagem eletroquímica apresenta baixos níveis de introdução de tensões residuais, praticamente zero, no entanto seu emprego é limitado pela geometria do furo resultante, pela dificuldade de emprego em conjunção com métodos ópticos e também porque o processo eletroquímico só pode ser utilizado em materiais condutores.

A técnica de usinagem eletroquímica ainda é relativamente pouco explorada para aplicação no método do furo, no entanto esta técnica apresenta-se promissora para materiais eletricamente condutíveis.

### 5.2.3. USINAGEM CONVENCIONAL

A escolha de usinagem convencional pode ser motivada por fatores tais como: o baixo custo, as dimensões apropriadas e a disponibilidade no mercado. Os dispositivos de furação se mostram eficientes e simples, podendo gerar furos com um fundo plano e de boa qualidade geométrica. Entre os diferentes métodos de usinagem podem ser empregados sistemas de alta velocidade compostos por turbinas a ar e sistemas de média e baixa velocidade baseados em furadeiras portáteis elétricas ou pneumáticas. Do ponto de vista da portabilidade e facilidade de

uso, as técnicas de usinagem a alta, média e baixa rotação são adequadas para trabalho de campo.

Com diâmetros abaixo de 1mm são indicados mandris com tolerâncias mais finas disponíveis exatamente para estas aplicações. As furadeiras de precisão portáteis elétricas (à bateria) geralmente possuem rotações máximas da ordem de até 50.000rpm, enquanto as turbinas à ar podem chegar a rotações acima de 500.000rpm. Existem também alguns pesquisadores que defendem a furação manual à baixas rotações. Estes três casos, e outras duas soluções alternativas de usinagem, são discutidos abaixo:

#### a.) Usinagem com baixas rotações

São consideradas ferramentas e furadeiras de baixas rotações aquelas que trabalham em torno de 1000 rpm. Operações realizadas manualmente são consideradas de baixíssimas rotações.

A furação à baixa velocidade não é indicada para a maioria dos materiais devido ao elevado nível de tensão residual introduzida durante a furação, geralmente tensão residual de tração. Para peças de alumínio, cobre e aço inoxidável, a furação com baixa rotação é totalmente inviável pois induz alta tensão residual podendo ser da ordem da tensão de escoamento do material.

#### b) Usinagem com médias rotações

São consideradas de médias rotações as que trabalham na faixa entre 10.000 e 50.000rpm. Resultados relativos à realização de furos com médias rotações não são facilmente encontrados na literatura.

#### c) Usinagem com altíssimas rotações

São consideradas furadeiras de altíssimas rotações aquelas que trabalham em torno de 400.000 à 600.000 rpm geralmente usando ferramentas de carboneto de tungstênio.

A técnica empregando altíssimas rotações demonstra bons resultados na usinagem de furos sem introduzir níveis consideráveis de tensões residuais. No entanto especial atenção deve ser dedicada tanto a materiais muito duros, assim como, com materiais muito dúcteis, como por exemplo aço inoxidável e alumínio. Um extenso trabalho realizado por Flaman foi dedicado ao estudo das técnicas de alta e baixa rotação [62]. Na Figura 5.3. são ressaltados os efeitos da usinagem de alta e de baixa rotação.

#### d) Técnica de usinagem orbital

Uma alternativa para viabilizar a usinagem de materiais muito dúcteis é a usinagem orbital com altíssimas velocidades, onde a ferramenta apresenta um diâmetro bem menor do que o furo realizado.

Através da fixação da turbina excentricamente na sua guia, é conseguido um movimento planetário (Figura 5.4). Este movimento permite a ação de corte de forma localizada e não em



toda superfície periférica do furo, o que facilita a remoção do cavaco [68].

e) Técnica da usinagem de furo cônico

Com o objetivo de aumentar a sensibilidade do método do furo com rosetas, Schaejer sugeriu a usinagem de furos cônicos (Figura 5.5.) [69]. Esta técnica é uma variante da usinagem orbital que além de facilitar o processo de usinagem permite aumentar os níveis de deformações presentes na superfície ao redor do furo. A análise dos dados utiliza coeficientes obtidos numericamente com modelo de elementos finitos especialmente desenvolvido para esta geometria. Esta técnica está em desenvolvimento e até o presente não se tem notícia de sua aplicação comercial.

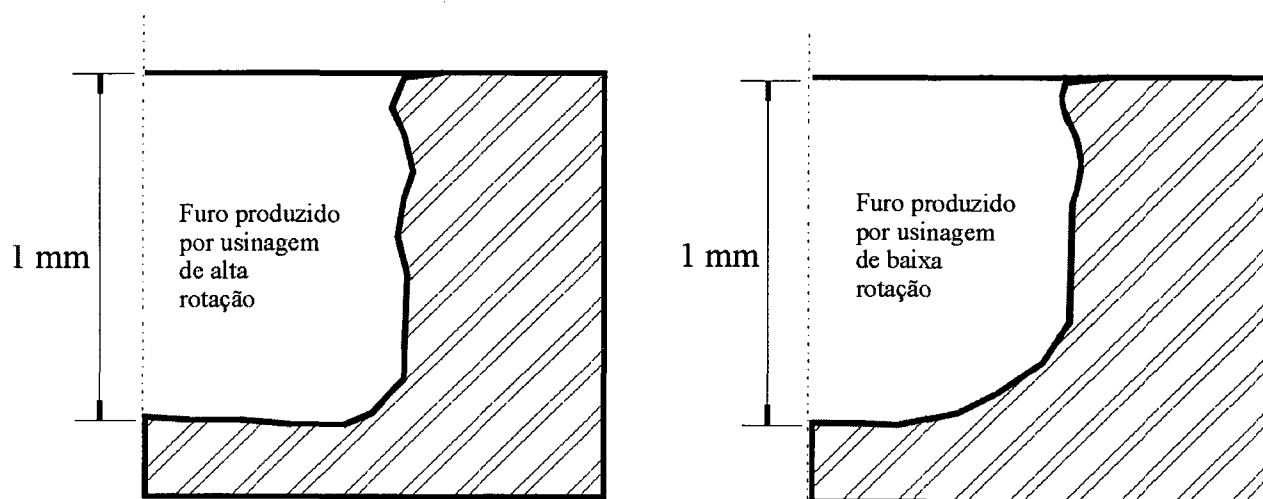


Figura 5.3 Comparação usinagem a baixas versus altas rotações [62].

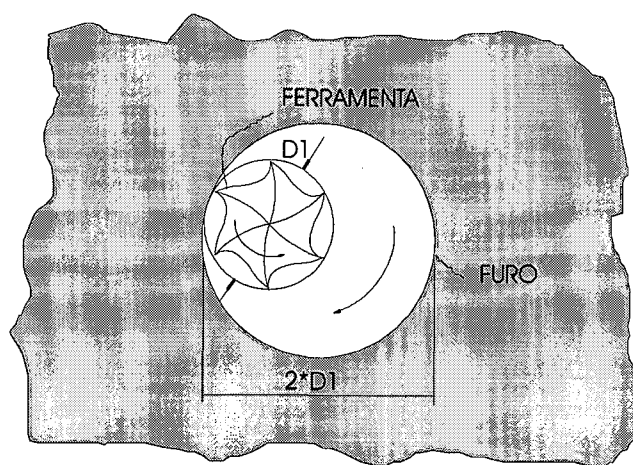


Figura 5.4. Usinagem excêntrica facilitando a saída do cavaco [ 68 ].

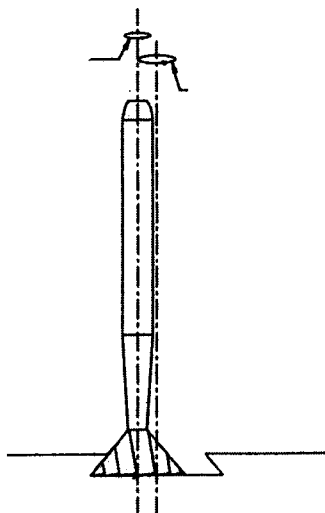


Figura 5.5. Usinagem de furo cônico [69].

### 5.3. OBTENÇÃO DE FUROS POR USINAGEM

Atualmente todas as técnicas de usinagem convencionais apresentadas anteriormente são utilizadas. No entanto sabe-se que a usinagem com turbinas pneumáticas de altíssimas rotações apresentam melhores resultados considerando no conjunto a geometria do furo e as tensões residuais introduzidas.

Turbinas de alta rotação e fresas cônicas invertidas de carboneto de tungstênio recobertas com nitreto de titânio apresentam as seguintes vantagens:

- a) produção de furos cujas superfícies laterais são menos rugosas e cujo fundo possui bordas menos arredondadas;
- b) baixa introdução de tensões residuais;
- c) portabilidade do sistema possibilitando a realização de testes "in situ";
- d) possibilidade de efetuar furos de pequenas dimensões o que viabiliza a determinação de tensão residual na superfície de forma localizada;
- e) possibilidade de ser aplicado na medição de tensões residuais em diversos materiais;

No processo de otimização da furação o tempo de corte e a preservação da vida da ferramenta ficam em segundo plano, pois não se trata de produção em série, o importante é minimizar o nível de tensões residuais introduzidas e maximizar a qualidade da geometria do furo através da escolha correta dos parâmetros de corte para diminuir as forças envolvidas no processo.

Para a usinagem com micro fresas de diâmetros inferiores a 1 mm não existem parâmetros tabelados e vários fatores imprevisíveis, como as irregularidades do material ou descentragem da ferramenta, influenciam muito mais na escolha dos parâmetros de corte. Cada caso deve ser examinado de forma particular pois as recomendações são apenas direcionamentos essencialmente baseados na tentativa e erro. Num trabalho de determinação dos parâmetros de corte para material acrílico, pode-se observar a grande diferença nas deformações induzidas no processo de furação dependendo do tipo de ferramenta, da velocidade de rotação e na utilização de mecanismo de avanço e recuo manual ou automático [70]. Para metais, normalmente a ferramenta que introduz menos tensões é a cônica invertida, já para o acrílico o mesmo não ocorre (Figura 5.6). Os parâmetros de corte, velocidade e velocidade de avanço também variam muito conforme o material (Figura 5.7.) [70].

Tipo de Ferramenta	Deformação induzida pela furação (µm/m)
Broca Helicoidal	10
Cônica Invertida de Carboneto Tungstênio	80
Cônica Invertida Carb. Tungst. lubrificada	60
Fresa Especial	250

Figura 5.6. Resultados de deformações introduzidas por diferentes ferramentas no acrílico [70].

Rotação (rpm) /Avanço	Deformação ER1 (µm/m)	Deformação ER2 (µm/m)	Deformação ER3 (µm/m)
800 / automático	20	60	68
800 / manual	20	10	20
1200 / automático	40	5	20
1200 / manual	10	15	20
2400 / automático	120	100	5
2400 / manual	100	45	40

Figura 5.7. Determinação experimental de parâmetros de corte para acrílico livre de tensões residuais. Sendo ER1, ER2 e ER3 as deformações medidas pelos extensômetros 1, 2 e 3.



### 5.3.1. FERRAMENTAS UTILIZADAS NA USINAGEM

Para minimizar a introdução de novas tensões residuais na peça em análise e devido a necessidade de uma geometria bem determinada, a ferramenta indicada para o processo de furação é uma fresa de topo.

Em 1966 Rendler e Vigness [33] utilizaram uma ferramenta, fresa de topo, com algumas modificações, para realizar a medição de tensões residuais. Atualmente são utilizadas fresas do tipo cônico invertida.

Como a meta é medir tensões residuais localizadas, é necessário o emprego de micro fresas da ordem de 0.6 até 1.6 mm de diâmetro. Para ferramentas destas dimensões existe menos espaço para a saída dos cavacos e a rigidez se torna um grande problema sendo que as irregularidades, inclusões e pontos de alta dureza do material a ser furado, são de grande efeito sobre a qualidade de corte.

Existem ferramentas especiais de 0.8 até 1.6 mm de diâmetro, porém de alto custo, fornecidas por empresas ligadas a área experimental, dedicadas exclusivamente a aplicação do método do furo. Uma alternativa de menor custo e facilidade de obtenção são as ferramentas dedicadas a uso odontológico cuja geometria é próxima da desejada.

Em geral as micro ferramentas são de carboneto de tungstênio, porém, revestimento de nitreto de titânio pode ser empregado para reduzir o atrito, melhorar o corte e diminuir o nível de tensão residual induzida pelo processo. De uma forma geral recomenda-se que para cada ensaio seja utilizada uma nova ferramenta.

### 5.3.2. MECANISMO DE USINAGEM COM TURBINAS PNEUMÁTICAS DE ALTÍSSIMA ROTAÇÃO

Os esforços mecânicos envolvidos durante o corte com turbinas pneumáticas não podem ultrapassar determinados valores para que a ferramenta não trave devido ao baixo torque existente. Esta característica é muito boa pois, as principais forças que ocasionam a geração de tensões residuais são as que ocorrem na direção tangencial, assim a quantidade de tensões residuais introduzidas fica automaticamente limitada pelo baixo torque.

Devido a condição imposta pelo uso de holografia, o corte não pode ser lubrificado. Sabe-se que no corte a seco a dissipação de calor é menor, isto pode provocar uma concentração de calor significativa que eleve a temperatura localizadamente e gere tensões térmicas. O próprio ar comprimido utilizado como propulsor da turbina pneumática dissipa parte do calor gerado pelo

cutor do cavaco e pelo atrito dos gumes. A concentração de calor é fortemente influenciada pela condutividade térmica da peça.

A taxa de remoção de material é influenciada por diversos fatores, principalmente pelo tipo de material que se está usinando. Em algumas situações velocidades de avanço muito pequenas são prejudiciais pelo fato do material apresentar grande deformação elástica e plástica não deixando que o gume inicie o corte. Esta situação provoca o aquecimento da peça devido ao grande atrito gerado entre o material e o flanco da ferramenta.

Em geral os diâmetros dos furos obtidos com as ferramentas de altíssimas rotações são maiores do que os diâmetros das ferramentas. Esta característica está relacionada à forma construtiva das ferramentas, ou seja, depende da forma geométrica e da excentricidade da ferramenta, assim como da rigidez do conjunto. Um modelo que simula a flexibilidade da ferramenta e do conjunto de furação é dado por um eixo rígido rotulado e conectado por um sistema de amortecimento e uma mola a uma barra rotacionando a alta velocidade (Figura 5.8.) [71]. Um problema comum das fresas odontológicas cônico invertidas, é que a geometria não é própria para o corte frontal. Na região central da ferramenta praticamente não existe corte, apenas o esmagamento do material. Pelo fato de não existir um sistema autocentrante, como ocorre normalmente nas brocas helicoidais, dado pela forma da ponta, as forças originadas no esmagamento do material atuam provocando o deslocamento lateral da fresa.

A vibração da ferramenta causada por problemas de geometria ou velocidade, causam o surgimento de forças que impulsionam a ferramenta contra o lado oposto do dente que está em ação. Esta vibração faz com que os gumes secundários atinjam a peça violentamente, arrancando material de forma indesejada e gerando tensões residuais.

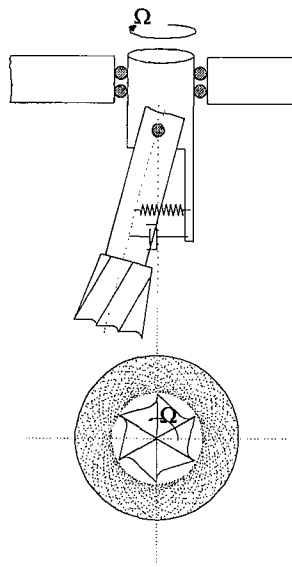


Figura 5.8. Representação esquemática da rigidez limitada do conjunto furadeira/broca por modelo equivalente.

### 5.3.3. ORIGEM DAS TENSÕES INTRODUZIDAS PELO PROCESSO DE FURAÇÃO

Normalmente as tensões residuais resultantes de operações de furação são tratativas. Estas são causadas devido à camada de material deformada plasticamente e à camada de material alterada estruturalmente. A alteração estrutural ocorre pelo endurecimento superficial e pelo aumento de defeitos microestruturais na parede do furo [72].

Os ângulos da ferramenta afetam o nível de força gerada e consequentemente o nível de tensões residuais introduzidas, por exemplo quanto maior o ângulo de cunha, maior é a força necessária para o corte (Figura 5.9).

A região sob influência de tensões residuais de usinagem (Figura 5.10) não é diretamente proporcional ao diâmetro do furo, o que é menos favorável para furos de pequena dimensão, pois a região de amostragem está muito mais próxima da região perturbada do que para furos maiores. A região sob influência das tensões residuais originadas pela usinagem, com valores entre 10 e 100% da tensão de escoamento, pode variar de 0,15 até 0,4 mm, conforme visto anteriormente na Figura 5.2.

Os fatores relativos à furação que influenciam na profundidade da camada deformada plasticamente e estruturalmente, portanto no nível de tensões residuais introduzidas são: força de corte, gradiente de temperatura, geometria e estado da ferramenta (ângulos de corte, de saída e de incidência, número de gumes, acabamento superficial, revestimentos de nitreto de titânio (NiTi) ou outros, raio de quina e o raio do gume), tipo de material usinado e taxa de remoção de material (Figura 5.11).

O acabamento superficial das faces da ferramenta implica num atrito maior ou menor, por sua vez afetando diretamente na quantidade de esforço necessário para o corte e na formação de gradientes de temperatura. Ferramentas recobertas com nitreto de titânio apresentam performance bem melhor do que as sem recobrimento devido à diminuição do atrito do cavaco contra a face da ferramenta. Portanto é aconselhado que a ferramenta adotada no método do furo possua gumes bem definidos e recobrimento com NiTi preferencialmente.

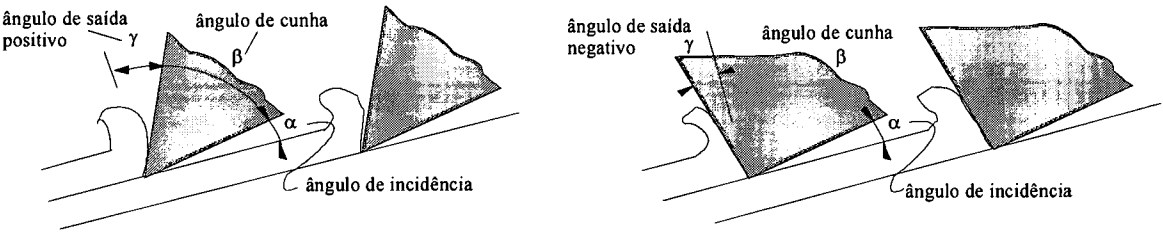


Figura 5.9 Influência dos ângulos da ferramentas na força gerada no processo de corte.

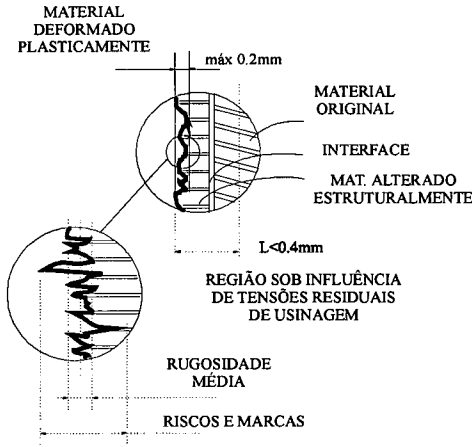


Figura 5.10. Região sob influência de tensões induzidas pelo processo de furação

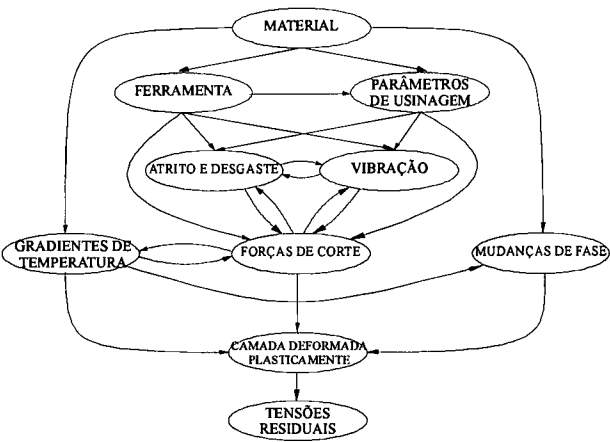


Figura 5.11. Fatores que influenciam na profundidade da camada deformada plasticamente.

5.3.4. MONTANTE DE TENSÕES RESIDUAIS INTRODUZIDAS NA USINAGEM

Na literatura não se encontram informações aprofundadas sobre os níveis de tensões residuais introduzidos nos casos de diâmetros menores do que 1mm. A verificação do nível de tensões residuais introduzidas pelo processo de usinagem torna-se difícil pelo fato de não ser possível isolar as tensões previamente existentes das provocadas por esta. Na maioria das publicações são envolvidas amostras “livres” de tensões residuais, obtidas por recozimento e estas informações não podem ser extrapoladas para os materiais no estado normal de aplicação na indústria [73]. Materiais que sofreram tratamento de alívio de tensões são mais fáceis de usinar e apresentam menores níveis de tensões residuais introduzidas do que materiais de baixa usinabilidade. Portanto, este caminho não é adequado para avaliar o nível real de tensão introduzido pelo processo de furação em materiais com estruturas diferentes, principalmente materiais muito duros ou materiais muito dúcteis.

## 5.4. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE OBTENÇÃO DE FUROS

Neste trabalho utilizou-se uma metodologia própria para investigar a geometria e a integridade da superfície dos furos usinados visando identificar as condições de furação mais propícias e que, ao mesmo tempo, produzissem a melhor geometria e apresentassem poucos indícios de introdução de tensões residuais.

Nos ensaios realizados foram utilizadas diferentes ferramentas e condições de corte sem a preocupação inicial de medir tensões residuais em amostras livres de tensões. Com a investigação pretendeu-se verificar e complementar os dados fornecidos na literatura a respeito de processo de furação através de ferramentas de corte e identificar os melhores parâmetros de corte para o furos de 0,6 até 1,6 mm de diâmetro. Os ensaios realizados envolveram a seleção das amostras, o processo de furação e a análise dos furos.

### 5.4.1. OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Convencionalmente as amostras livres de tensões são obtidas por recozimento. No entanto, deve ser observado que este tratamento térmico altera as propriedades do material da amostra, principalmente dureza e as propriedades de usinabilidade. A diminuição da dureza, após o recozimento, torna a amostra mais fácil de usinar e portanto causa uma diminuição das tensões induzidas pela furação quando comparadas com as tensões normalmente induzidas nas peças no seu estado normal de fabricação sem o recozimento.

Com o objetivo de reproduzir o melhor possível as condições reais de utilização, foram obtidas amostras de peças de aplicação comum e de chapas no estado normal de utilização: alumínio de pistão automotivo, ferro fundido cinzento de carcaça, placas laminadas de Al, aço de baixo carbono, aço inox austenítico e aço inox martensítico.

Os corpos de prova foram rigidamente fixados para evitar deslocamentos laterais que pudessem influir na cilindridade do furo e deslocamentos perpendiculares à superfície que interferissem na medição da profundidade. Antes do início das furações as amostras foram identificadas através de marcas.

### 5.4.2. FURAÇÃO

O procedimento de furação deve ser contínuo, bem controlado e repetitivo. O controle da profundidade foi realizado considerando como referência a posição em que a ferramenta entra em contato com a amostra. Para identificar esta posição utilizou-se uma câmera CCD e também o contato elétrico ferramenta/peça a medir.

Como nível inicial para avanço em profundidade adotou-se a taxa de 0,1 mm/min. No entanto nos ensaios seguintes verificou-se que com esta velocidade o processo de corte é pulsado, devido as folgas axiais dos dispositivos de furação, e que o avanço de 0,4mm/min é o mais indicado.

Durante a furação montou-se um sistema de coleta de cavacos consistindo de uma lâmina de vidro contendo uma película de vaselina líquida responsável pela retenção dos cavacos, posicionada próxima à região furada. A análise dos cavacos mostrou que a maioria possui dimensão de 0,05 mm, a menos dos casos de corte pulsado cujos cavacos são maiores.

#### a). Análise do dispositivo de Furação

Nos ensaios foram utilizados vários sistemas de usinagem, os mais importantes foram o dispositivo próprio para medição de tensões residuais (designado de sistema 1) [50], a turbina de mancais aerostáticos, (sistema 2) e o sistema de furação de precisão (sistema 3).

O sistema 1, fabricado comercialmente e largamente utilizado com rosetas no método do furo, possui sistema de guias com grandes folgas quando comparado com o diâmetro do furo de 0,6 mm. O efeito destas folgas é a produção de furos irregulares não respeitando a condição de cilindricidade exigida. Para eliminar ou, pelo menos, diminuir a influência destas folgas foram introduzidos elementos elásticos forçando o eixo central contra a superfície lateral da guia e também uma mola na vertical para vencer o atrito criado e possibilitar o avanço vertical do eixo central.

Com relação a profundidade ficou caracterizada que a simples medição do deslocamento vertical do corpo do sistema 1 não é uma forma segura para caracterizar a profundidade alcançada, devido as folgas axiais existentes no conjunto formado pelos rolamentos e rotor da turbina pneumática. Por este mesmo motivo, o sistema 1 não permite a obtenção de taxa de avanço constante.

O sistema 2, contendo uma turbina de altíssima rotação construída sob mancais aerostáticos, também apresenta recuo da ferramenta no momento do contado com a peça. No entanto, o sistema de avanço adotado para os experimentos, foi montado num conjunto de

microposicionamento e cujo movimento foi executado por motores controlados por computador. Este sistema permite manter constante a velocidade de avanço da ferramenta, evitando paradas como normalmente acontecem no avanço manual. As paradas de ferramenta ocasionam, no mínimo, riscos na superfície lateral do furo quando não modificam sua forma criando degrais.

O sistema de furação de precisão, sistema 3, apresentou os melhores resultados, quanto a geometria do furo, dentre todos os outros. As folgas radiais e axiais são desprezíveis para as fresas de 0,6mm de diâmetro. Com a utilização do conjunto de microposicionamento pode-se controlar a profundidade com incertezas da ordem de  $\pm 0,005$  mm.

#### **b). Análise das Ferramentas**

É indicado realizar a inspeção das ferramentas antes de iniciar um furo para verificar possível desgaste ou quebra de aresta cortante. Os modelos das ferramentas utilizadas foram:

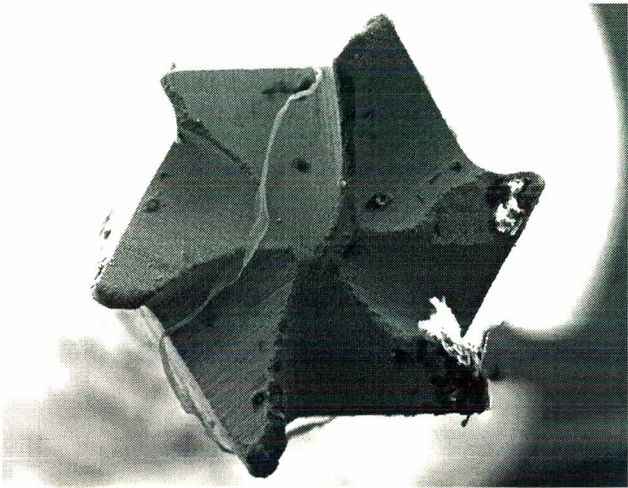
- fresa cônico-invertida de alta rotação, de aplicação dentária com diâmetro de 0,6mm;
- ferramenta diamantada cônico-invertida de aplicação dentária, diâmetro de 0,6mm;
- fresa especial para medição de tensões residuais de 0,8 e 1,6mm de diâmetro.

Também foram analisadas ferramentas de diversos fabricantes, inclusive ferramentas recobertas com nitreto de titânio, e algumas ferramentas dedicadas ao corte com baixas rotações.

Nas figuras a seguir, feitas em microscópio eletrônico de varredura, podem ser vistas as diferenças na geometria das ferramentas, o estado de desgaste e impregnação de cavacos. Na Figura 5.13. estão seis ferramentas usadas, todas de alta rotação. Devido a operação de usinagem ocorre o esmagamento na região central, fratura de dentes e incrustação de cavacos nos gumes. Na Figura 5.14 vê-se o pior acabamento das ferramentas novas de baixa rotação, a região central, que não conta com gumes, é bem maior e é comum a presença de dentes quebrados e esmagados nestas ferramentas. A forma arredondada, da face frontal, das ferramentas diamantadas, a dificuldade de saída dos cavacos e a irregularidade dos grãos de diamante também são evidentes. Pelas características geométricas gerais e principalmente devido a presença de ângulos de saída positivos, que introduzem menos tensões residuais, as ferramentas 1 e 6 foram escolhidas como as mais apropriadas.

Nas Figuras 5.12 e 5.13 e no restante do capítulo 5 as ferramentas identificadas por números são especificadas na referência [74].

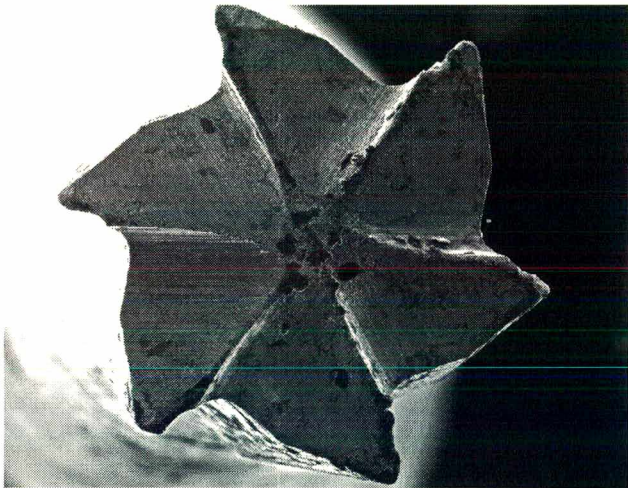




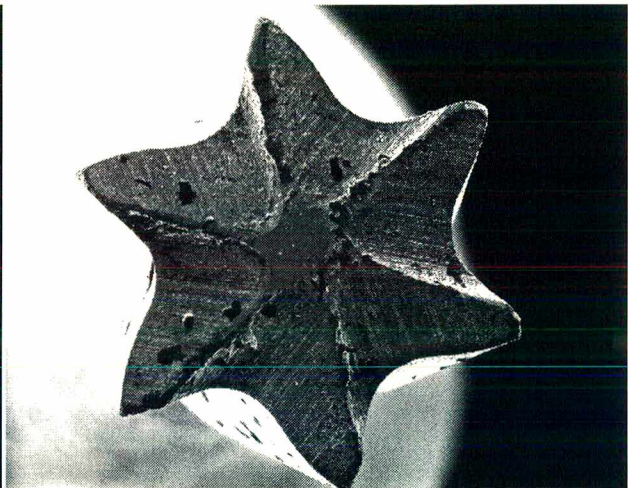
FERRAMENTA 1 - 100X



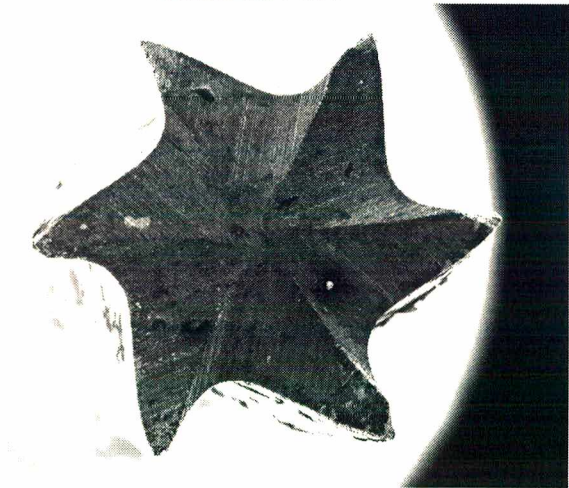
FERRAMENTA 2 - 100X



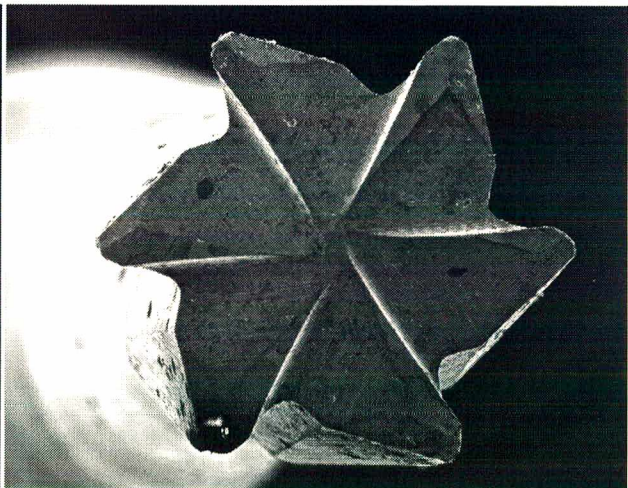
FERRAMENTA 3 - 100X



FERRAMENTA 4 - 100X



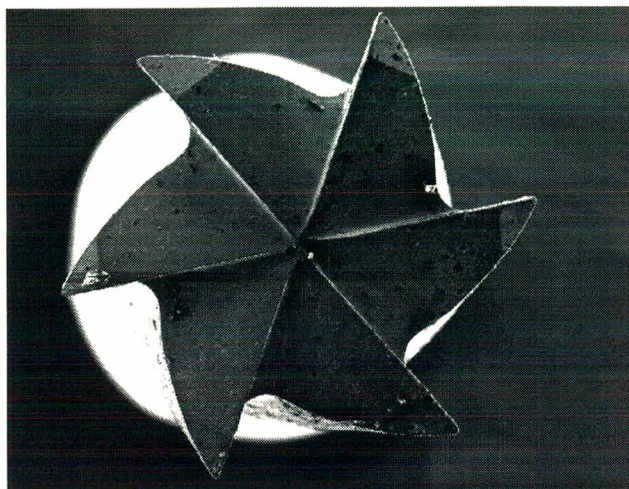
FERRAMENTA 5 - 100X



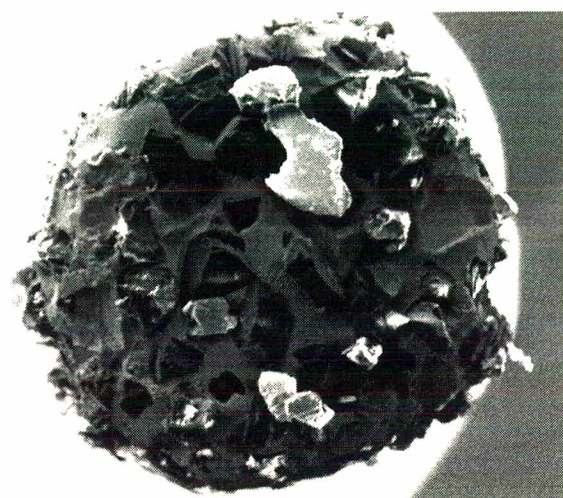
FERRAMENTA 6 - 80X

Figura 5.12. Ferramentas de alta rotação de carboneto de tungstênio [74].

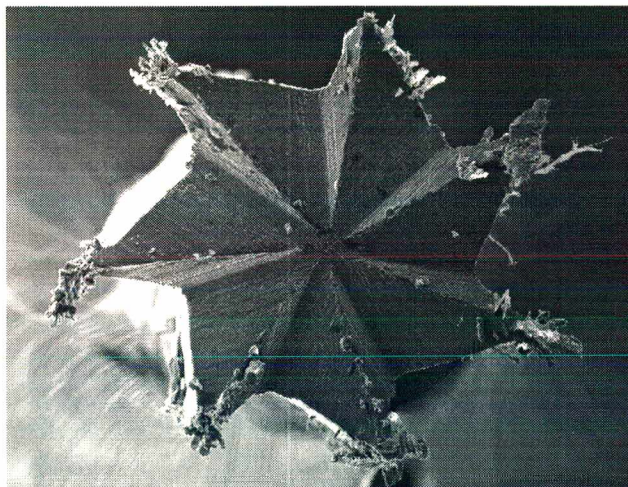




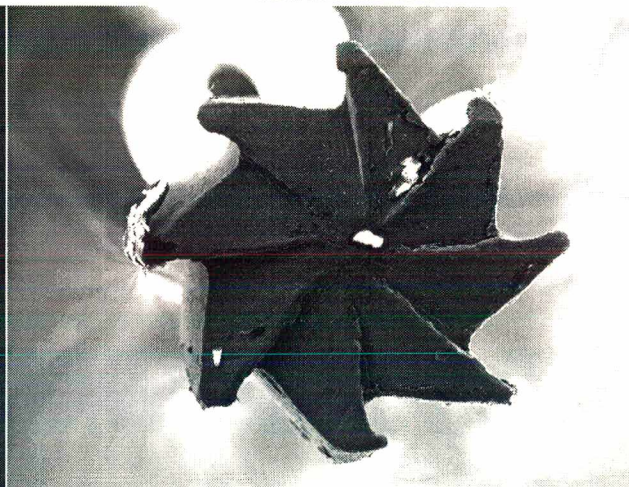
FERRAMENTA 7 - 45X



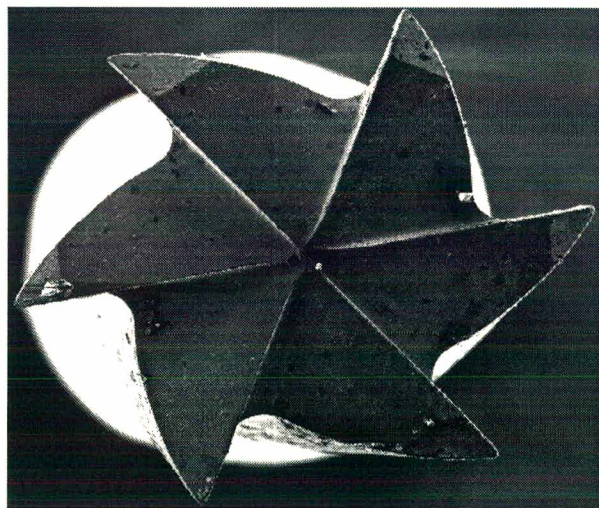
FERRAMENTA 8 - 100X



FERRAMENTA 9 - 100X



FERRAMENTA 10 - 100X



FERRAMENTA 11 - 45X

Figura 5.13. Ferramentas de baixa (aço rápido) e alta rotação (carboneto de tungstênio e diamantada) [74].



### 5.4.3. ANÁLISE DOS FUROS

Cada fileira de furos foi cortada transversalmente para possibilitar a quantificação das características geométricas no microscópio óptico de medição e a análise do tipo de corte e da microestrutura no microscópio eletrônico de varredura. A seguir é feita uma descrição detalhada de cada parâmetro analisado:

#### a). Medição da Forma

Para avaliação quantitativa da forma do furo foram medidos os diâmetros dos furos e das ferramentas utilizadas, a profundidade e a ortogonalidade. As medições dos diâmetros dos furos e das ferramentas foram realizadas em microscópio óptico de medição com aumento de 100 vezes. A análise da profundidade e da ortogonalidade foi feita nos cortes transversais dos furos.

Qualitativamente verificou-se a cilindricidade e a existência de fundo plano (Figura 5.14). A verificação da cilindricidade foi prejudicada pela dificuldade de realização do corte transversal.

#### b). Análise do Nível de Tensões Residuais Introduzidas na Usinagem

A análise do nível de tensão residual induzida pelo processo de furação foi indiretamente avaliada por análise metalográfica, por análise da superfície usinada por microscopia eletrônica e através de processo de medição de tensões residuais comparativo.

A análise metalográfica pôde revelar se o método de usinagem do furo produz ou não alterações na microestrutura do material investigado e a ocorrência de plastificação ou

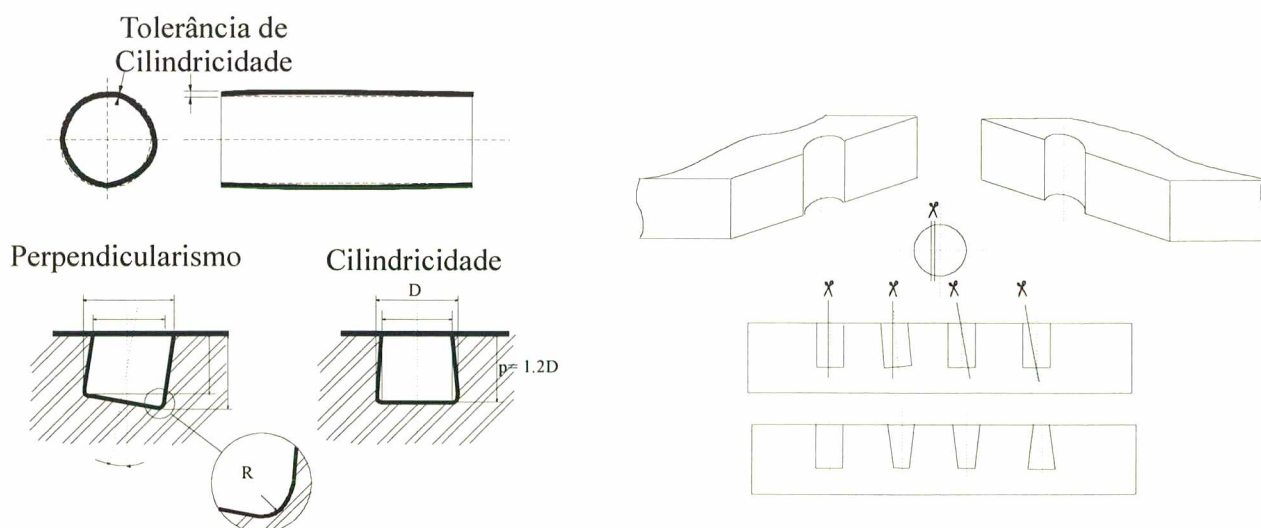


Figura 5.14. Cortes transversais dos furos com o objetivo de verificar ortogonalidade, fundo

plano e cilindricidade.

endurecimento. Indícios da introdução de tensões residuais são as alterações dos microconstituintes como, por exemplo, nos aços, o endurecimento do material, e o aumento da dificuldade de usinagem ocorre como consequência da formação de martensita que pode ser identificada pelo aumento do percentual de ferrita.

Objetivando quantificar o nível de tensões residuais introduzidas, foram feitos exames metalográficos utilizando ataques com Nital 2%. Com o ataque químico buscou-se identificar a alteração da formação martensítica, devido a aquecimento local provocado pelo processo de corte, e as mudanças na forma e tamanho dos grãos em regiões deformadas plasticamente, próximas da borda do furo, através da comparação com grãos distantes da região de influência. Como os níveis de deformação plástica que ocorreram na lateral do furo foram muito pequenos, não foi possível identificar a extensão da região deformada plasticamente. A camada deformada plasticamente é formada por cavacos não cortados cuja espessura varia em alguns casos em torno de 10 $\mu$ m conforme a ferramenta utilizada. Outras análises podem ser realizadas utilizando-se ataque com ácido nítrico e depois ácido clorídrico para os furos realizados em chapa de aço inox martensítico.

O processo para determinar o nível de tensão residual induzido pela furação foi conduzido pela comparação dos efeitos de diferentes procedimentos, ferramentas e equipamentos, utilizando as amostras citadas anteriormente. A análise qualitativa foi baseada na identificação do mecanismo de corte: se houve esmagamento do material contra a parede do furo ou se houve corte cisalhante. Para esta análise foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura.

A terceira forma de avaliar o nível de tensões residuais introduzidas pelo processo de furação é a realização de ensaios com amostras livres de tensões utilizando HE ou rosetas extensométricas. Quando as deformações ou deslocamentos medidos são baixos, pôde-se deduzir que o recozimento e o processo de furação geraram pouca tensão residual.

## 5.5. CONDIÇÕES FINAIS DOS FUROS

A determinação das condições ótimas do processo de furação foi realizada a partir das características de forma e estruturais dos furos produzidos por cada ferramenta, com diferentes velocidades de avanço e em diferentes materiais.

Os furos foram realizados em amostras de aço de baixo carbono, de aço inox, em ferro



fundido cinzento e em liga de alumínio. Utilizou-se ferramentas de carboneto de tungstênio de aplicação dentária denominadas 33 1/2" de alta rotação produzidas por diferentes fabricantes. Com os dispositivos de furação disponíveis foram realizados diversos furos, variando-se a ferramenta utilizada e a velocidade de avanço de 0,1 , 0,2 , 0,4 e 0,8 mm/min.

A monitoração da execução dos furos foi realizada com o auxílio de uma câmera de TV, com uma lente macro, posicionada de tal forma a visualizar a ferramenta e a superfície da peça.

Foram feitos vários furos com todas as ferramentas disponíveis de forma a identificar as que mais se adequam à tarefa de produzir furos com geometria bem definida introduzindo menor quantidade de deformação plástica na superfície.

A qualidade do furo pôde ser julgada pelos seguintes fatores:

- a) forma geométrica: diâmetro, circularidade, cilindridade, profundidade, fundo plano, ortogonalidade a superfície;
- b) modificações da rugosidade da superfície ou presença de rebarbas;
- c) integridade das paredes internas;

### 5.5.1. DIÂMETRO

Os diâmetros obtidos foram muito diferentes dos diâmetros das ferramentas utilizadas. Para as ferramentas no. 1 [74] o diâmetro médio da broca é 0,63 +/- 0,03 mm, considerando variações entre ferramentas e os erros de medição. Os furos obtidos apresentaram diâmetros de 0,78 +/- 0,01mm. Através destes valores conclui-se que as folgas e desalinhamentos contribuem em média com 0,15mm no diâmetro.

Para as ferramentas no. 2 [74] constatou-se que o diâmetro médio das ferramentas daquele lote era de 0,69 +/- 0,01 mm. Os furos apresentaram diâmetros de 0,97 +/- 0,01 mm. As folgas e desalinhamentos resultaram uma elevação de 0,27 mm no diâmetro.

Em geral, os diâmetros dos furos não sofreram influência do aumento da velocidade de avanço. Apenas a ferramenta no. 3 [74] produziu furos cujos diâmetros foram alterados proporcionalmente ao aumento da velocidade de avanço.

Para a maioria dos ensaios foi medido tanto o diâmetro da ferramenta como o diâmetro do furo. Através da análise destes dados, verificou-se que a ferramenta no. 1 apresentou melhor comportamento para todos os casos analisados. A menor diferença entre o diâmetro do furo e o diâmetro da ferramenta foi interpretada como indício que o processo de furação ocorreu com menos vibração, portanto menores esforços de corte e menor tensão residual induzida (Figura 5.15.).

5.5.2. CIRCULARIDADE

Os níveis de erros de circularidade encontrados são da mesma ordem da incerteza da sua medição com um microscópio óptico devido à dificuldade de se identificar a borda. Permaneceu dentro da faixa de +/-0,01mm.

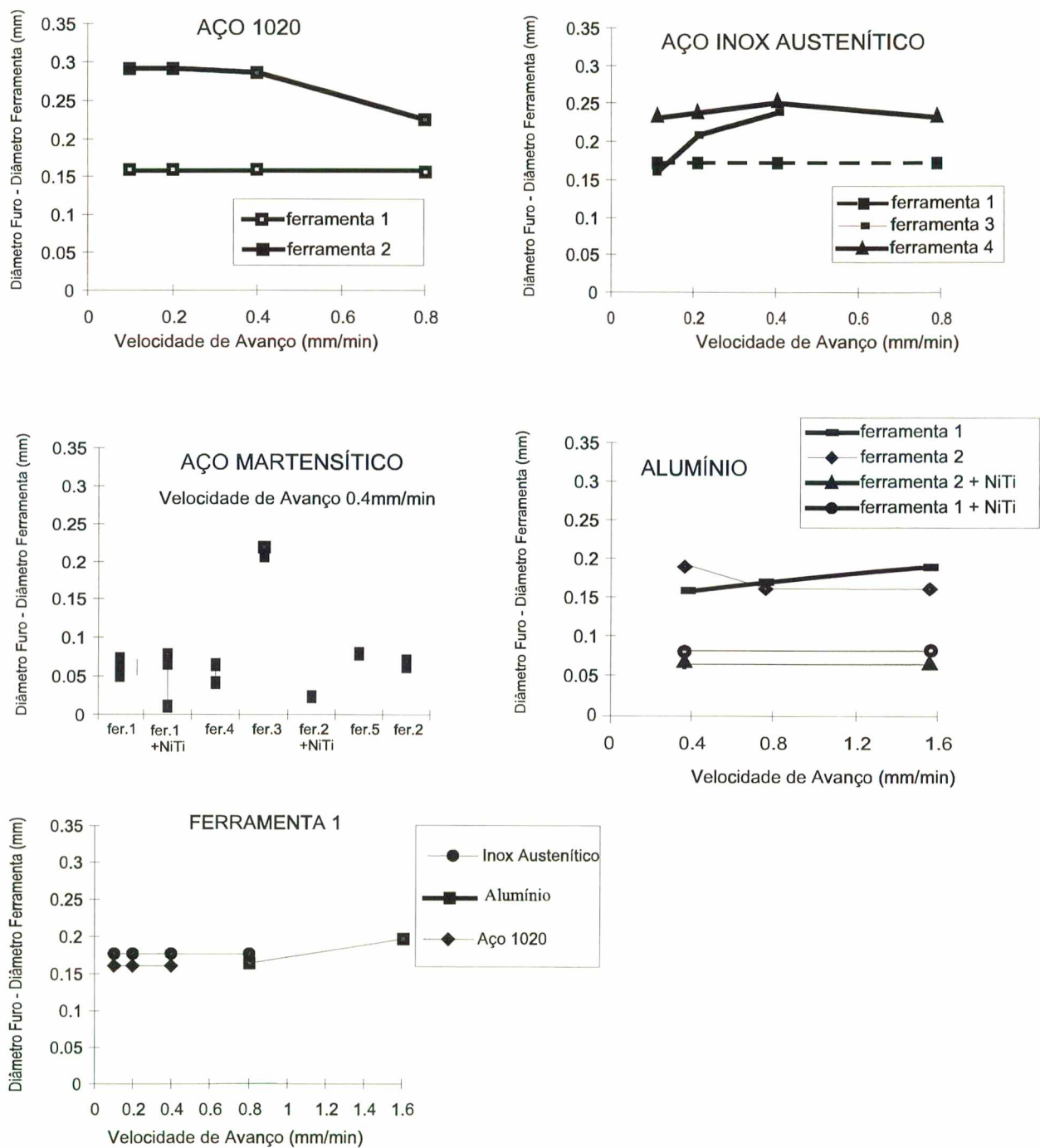


Figura 5.15 Dependência da diferença entre os diâmetros do furo e da ferramenta, com a velocidade de avanço.

### 5.5.3. CILINDRICIDADE

O erro de cilindridade do furo é difícil de avaliar devido a forte influência de eventuais erros no corte transversal. Alguns furos aparentam a forma cônica, alargados ou no fundo do furo ou algumas vezes no topo, podendo a causa ser decorrente do processo de furação ou devido ao desalinhamento do corte transversal. Em alguns casos a falta de cilindridade é evidente, principalmente nos furos executados com o instrumento especial de furação para o método do furo.

Com a utilização de turbina de altíssima rotação o número de choques e identações na parede do furo é muito alta, fazendo com que a forma final seja cilíndrica porém com alta rugosidade. Nos cortes transversais dos furos feitos com turbina de ultra-velocidade, constatou-se ângulo de conicidade aparente de no máximo 2°.

### 5.5.4. PROFUNDIDADE

O controle da profundidade do furo é dependente do tangenciamento correto da ferramenta, da incerteza do sistema posicionador e das folgas axiais existentes na turbina pneumática.

Com o acompanhamento pela câmera de TV conseguiu-se nos melhores casos determinar a posição de tangenciamento da ferramenta com uma incerteza de  $\pm 0,003$  mm. No entanto, na maioria dos furos esta posição foi detectada com incerteza de  $\pm 0,01$  mm. A resolução da mesa microposicionadora é menor do que  $1\mu\text{m}$ , portanto a profundidade do furo é afetada de um erro menor do que  $\pm 0,01$  mm. Como proposta para eliminar o monitoramento do tangenciamento da ferramenta através da câmera CCD testou-se um circuito composto por uma lâmpada, uma bateria e contatos elétricos ligados à peça e à ferramenta. Este sistema elétrico apresentou-se ineficiente pelo fato da necessidade do contato elétrico direto na ferramenta introduzindo desalinhamentos e também pela dificuldade de se perceber o instante em que a lâmpada acende. Este último problema pode ser resolvido através do uso do sinal como um "trigger". A identificação da posição de contato da ferramenta, feita pela modificação no ruído da turbina pneumática, leva a piores resultados.

O maior problema identificado ainda é a diferença entre a profundidade indicada e a profundidade real, esta diferença depende muito da fixação da broca no mandril da turbina pneumática, dos esforços axiais que ocorrem durante o corte e do material sendo usinado. Esta diferença pode ser da ordem de décimos de milímetro, no entanto nos experimentos foi considerada a profundidade real medida com o microscópio óptico. Na aplicação final da técnica torna-se necessário a adoção de um mecanismo que garanta melhores resultados.



5.5.5. FUNDO PLANO

A planicidade do fundo do furo varia em torno de  $\pm 0,025\text{mm}$ . Para algumas ferramentas o raio do furo na profundidade máxima é cerca de  $0,1\text{mm}$  menor do que no restante do furo (Figura 5.16). A ferramenta no.1 foi a que melhor definiu a forma do fundo do furo pelas suas características geométricas.

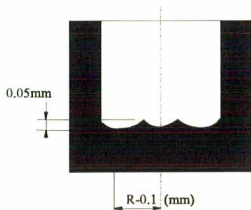


Figura 5.16 Fundo de furo típico para ferramenta número 1.

5.5.6. ORTOGONALIDADE

Para melhorar a ortogonalidade entre a ferramenta e a superfície da peça, em alguns ensaios foram feitos alinhamentos com o auxílio de laser (Figura 5.17). O sistema utilizado para o alinhamento, da ferramenta com o sistema de deslocamento axial se mostrou eficiente. No entanto, este sistema não evitava o desalinhamento da peça com relação ao avanço da ferramenta.

Na análise dos furos verificou-se que o erro de ortogonalidade, descontando a conicidade do furo chegou a ser de até  $\pm 2^\circ$ . Nos casos de aplicação prática da técnica o controle de ortogonalidade é de difícil solução pois, apesar de existir mecanismos de ajustes, normalmente não existe instrumento para a medição da ortogonalidade. O sistema utilizado apresentou bons resultados, provou sua viabilidade e pode ser implementado de uma forma simples com os recursos de lasers diodos de pequenas dimensões [70].

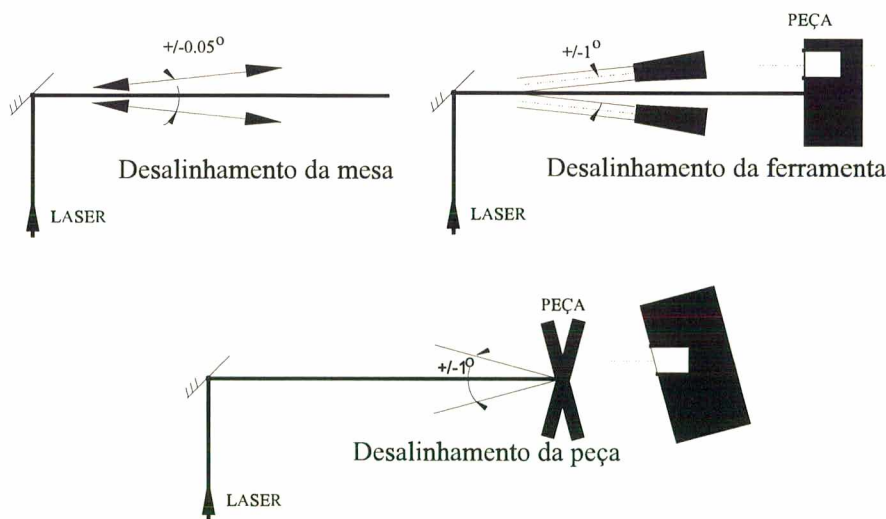


Figura 5.17. Alinhamento obtido com o uso de laser.

### 5.5.7. QUALIDADE DA PAREDE DO FURO

O tipo de cavaco originado do corte com turbinas de altíssimas velocidades é proveniente do ângulo de saída pequeno, nulo ou negativo normalmente encontrado nas ferramentas odontológicas.

As amostras de cavacos coletados dos furos apresentam maior número de cavacos de dimensão menor do que 0,01X0,01 mm, menor quantidade de cavacos de dimensão inferior a 0,05 X 0,05 mm e pouca quantidade de cavacos de dimensão de 0,1X0,1 mm.

A superfície interna dos furos apresenta-se com grande rugosidade, como se fosse formada por escamas. Uma análise dimensional do tamanho das reentrâncias leva a uma correlação direta com o tamanho dos cavacos. As maiores reentrâncias apresentam dimensão menor do que 0,1X0,1mm e algumas possuem dimensão de 0,05 X 0,025 mm. Dentro destas cavidades nota-se a presença de riscos de 1µm de largura.

A análise da superfície da parede do furo revela a presença de alguns fragmentos de cavacos amassados e parcialmente ligados à superfície. Este tipo de comportamento é devido à formação de falsa aresta de corte que vai aumentando até que se desprende, aderindo parte no material e parte ao cavaco. A falsa aresta de corte ocorre devido ao grande atrito na superfície de saída da ferramenta com o aumento da temperatura e devido à grande resistência ao cisalhamento do material sobre a face da ferramenta.

Nos ensaios realizados notou-se forte correlação da rugosidade da superfície do furo com a forma geométrica da ferramenta. Durante o processo de furação verificou-se, através da câmera de TV, o mecanismo responsável pelo ruído agudo pulsado que variava conforme a velocidade de avanço da ferramenta: devido a existência de folgas no sentido longitudinal a ferramenta apresenta um movimento axial de recuo quando as arestas tocam a peça sendo novamente impulsionadas de encontro a esta pelo avanço contínuo. Na região central da broca não existe um mecanismo eficiente de corte provocando apenas o esmagamento do material no centro da mesma. O material esmagado se acumula até que as forças de reação provocam um deslocamento radial da broca. Quando a broca é desviada radialmente, as arestas cortantes da periferia atuam na região central retirando a camada de material esmagado no centro do furo.

Devido a presença de folgas radiais na turbina pneumática, verificou-se que, mesmo na ausência de avanço axial, ainda existe a possibilidade de corte lateral aleatório devido ao movimento orbital causado pelas forças centrífugas e giroscópicas.



### 5.5.8. EXTENSÃO DA ZONA DEFORMADA PLASTICAMENTE

A deformação plástica no fundo do furo ocorre com maior intensidade nas proximidades da região central do furo. O acúmulo de material na região central, em conjunto com as folgas radiais e axiais e a baixa rigidez da haste da broca aparentam ser os mecanismos responsáveis pelo processo de corte pulsado e também pela forte vibração lateral que ocorre quando se aumenta a velocidade de avanço.

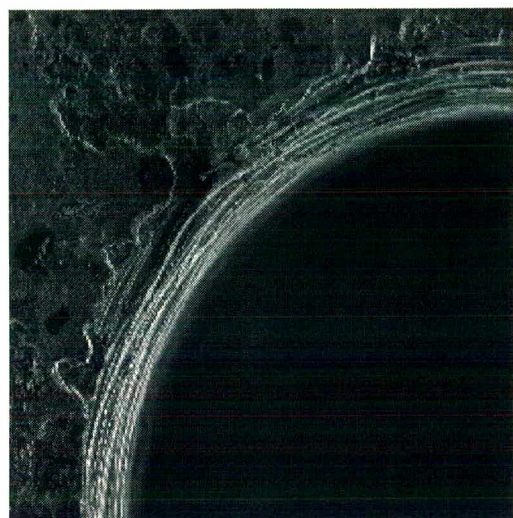
Na Figura 5.18. são mostradas regiões onde o corte ocorreu uniforme e regiões onde além do ocorreram deformações plásticas no fundo dos furos. Percebe-se claramente que, na proximidade da região central, existe uma grande quantidade de cavacos esmagados contra o fundo do furo. Nas regiões periféricas o corte é mais uniforme.

Na Figura 5.18.e) (furo 1 da amostra de inox, 0,1mm/min de avanço, 0.84mm de diâmetro) pode-se perceber claramente pelas linhas de corte que o centro da broca se desloca lateralmente gerando um movimento vibratório. Na Figura 5.18. g) (amostra de aço inox, velocidade de avanço 0,4mm/min, diâmetro de 1,47 mm), as deformações plásticas são ainda mais evidentes. Estas deformações plásticas introduzidas no fundo do furo originam tensões residuais que afetam o campo de tensões pré-existent, mas têm pouca influência sobre a medição.

Conforme a usinabilidade do material e a velocidade de avanço, as condições de corte no fundo do furo são modificadas como pode ser visto através das figuras anteriores. Nas Figuras 5.18 c) e d) vê-se que os fundos dos furos realizados em aço apresentam marcas de corte mais concêntricas e com menos esmagamento do que os vistos na Figura 5.18 g) e h) Nas Figuras 5.18 e) e f) estão ampliadas as regiões da Figura 5.18. c) e d), onde houve corte e onde houve esmagamento do material, respectivamente.

A análise dos perfis dos furos obtidos com as ferramentas 1 e 2, em amostras de aço de baixo carbono, revela que a superfície lateral obtida com a ferramenta número 1 é mais apropriada pela forma mais cilíndrica obtida e com escavações laterais mais uniformes. Por outro lado, a maior presença de cavacos esmagados contra a superfície da parede do furo 2 revela um mecanismo de corte que introduz mais tensões. O esmagamento do fundo do furo pode ser usado como um indicativo da dificuldade de usinagem. A presença de choques nas paredes laterais do furo dependem da usinagem do fundo do furo, um corte irregular com muita vibração gera o esmagamento da superfície lateral e introduz tensões residuais nas paredes laterais pela deformação plástica. As tensões originadas da deformação plástica na lateral do furo podem afetar diretamente a medição da tensão.

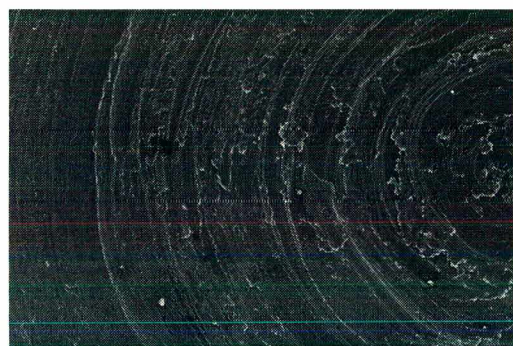




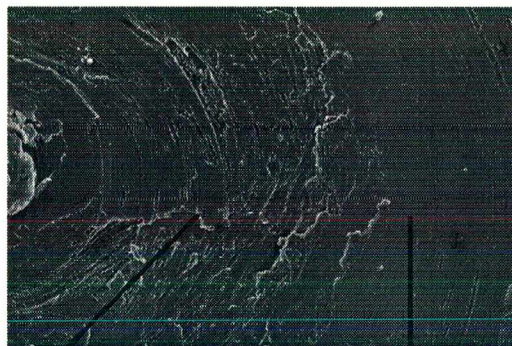
a) Borda de furo típica de aço de baixo carbono  
Ferramenta 1 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$



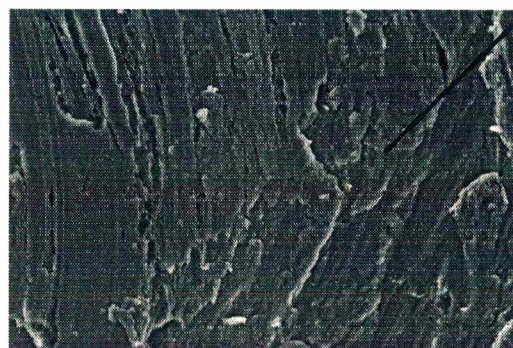
b) Borda de furo típica de aço de baixo carbono  
Ferramenta 2 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$



c) Deformação Plástica do fundo do furo em aço de baixo carbono  
ferramenta 1 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$  (700X)



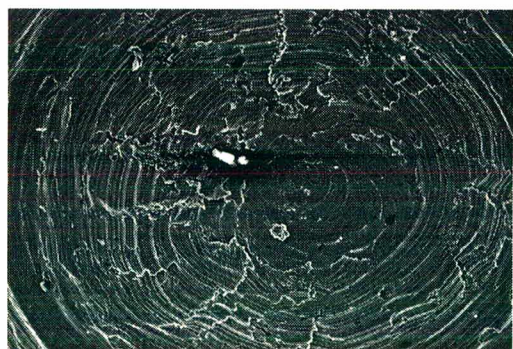
d) Deformação Plástica do fundo do furo em aço de baixo carbono  
ferramenta 2 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$  (700X)



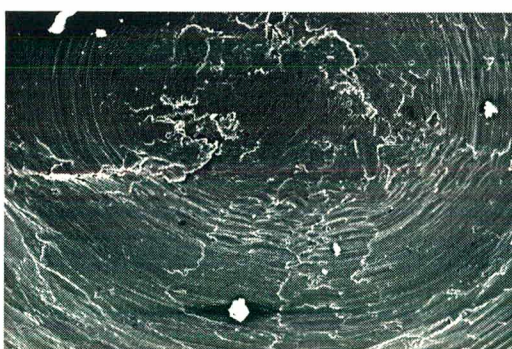
e) Deformação Plástica do fundo do furo em aço de baixo carbono  
ferramenta 2 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$  (5000X)



f) Deformação Plástica do fundo do furo em aço de baixo carbono  
ferramenta 2 e  $v_a=0.4\text{mm/min}$  (5000X)



g) Deformação plástica no fundo do furo feito em aço inox  
com ferramenta 1 e  $v_a=0.1\text{mm/min}$



h) Deformação plástica no fundo do furo feito em aço inox  
com ferramenta 2 e  $v_a=0.1\text{mm/min}$

Figura 5.18 Deformação plástica no processo de furação [74].



### 5.5.9. PRESENÇA DE REBARBAS

Geralmente a qualidade da borda produzida por estas ferramentas é adequada a menos do problema de escorregamento no início da furação, devido a não possibilidade de puncionamento inicial para guiar a ferramenta. No caso de materiais plásticos pode ocorrer acumulação de calor nas arestas cortantes devido à alta velocidade de corte, o que faz o material ser extrudado em vez de cortado, o que origina maior presença de rebarbas. Para os metais utilizados nos ensaios de furação constatou-se o aumento da presença de rebarbas com o aumento da velocidade de avanço.

A superfície externa ao redor do furo é alterada pela presença de rebarbas cuja altura permaneceu menor que 0,01mm e acréscimo no raio menor que 0,02 mm.

A presença de rebarba ao redor do furo aumenta com o aumento da velocidade de avanço. No entanto, mantém-se dentro de um raio máximo igual a  $R+0,05\text{mm}$  e isto não prejudica a amostragem de deslocamentos por holografia eletrônica. Nos furos das Figuras 5.19, realizados em chapa de aço INOX, pode-se perceber bordas bem definidas para os furos realizados com velocidade de avanço de 0,1mm/min e aumento da quantidade de rebarbas com o aumento da velocidade de avanço. As ferramentas de diferentes fabricantes apresentam comportamento semelhante. Quando a variável é o material da peça, a quantidade de rebarbas apresenta modificações. No aço 1020 são bem perceptíveis as bordas dos furos, não aparecendo rebarbas como os furos da Figura 5.19.

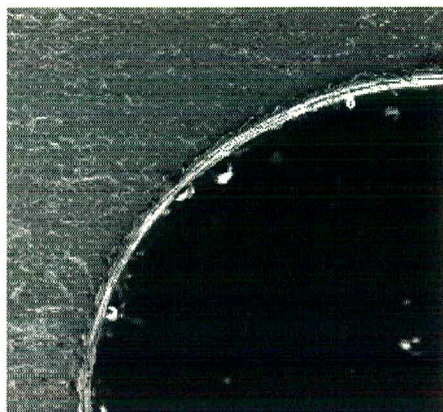
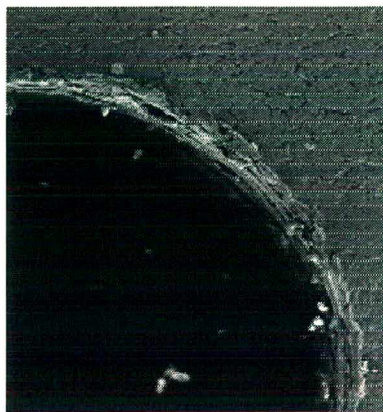
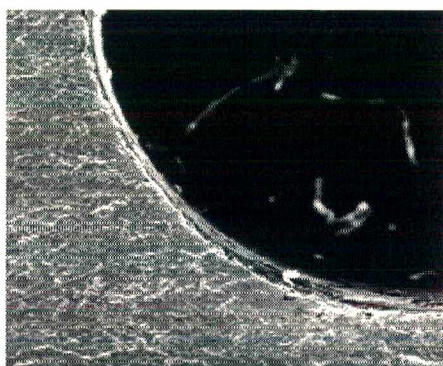
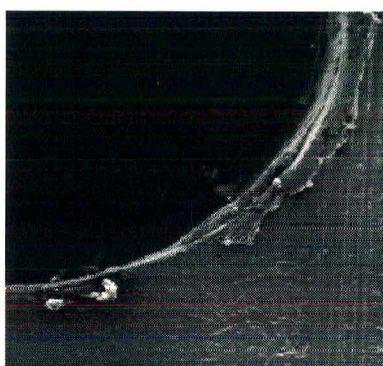
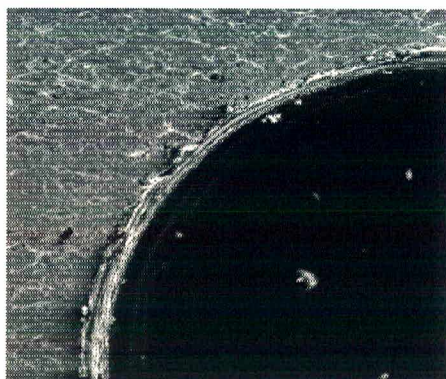
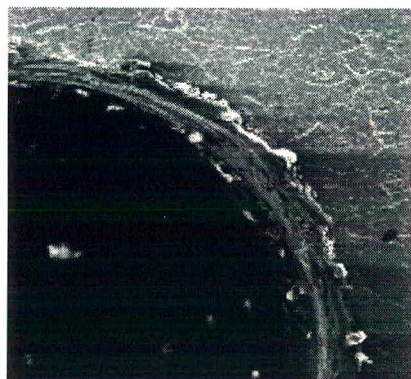
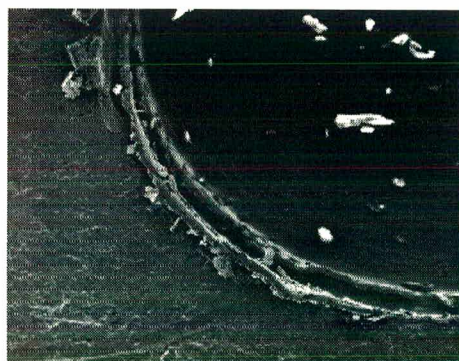
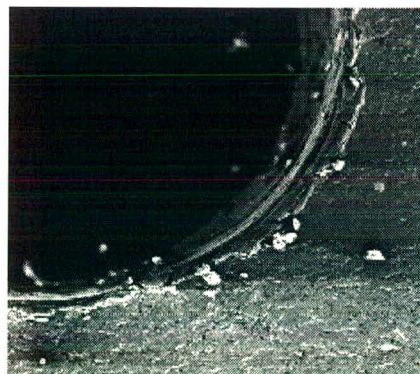
Ferramenta 3 c/  $va = 0.1\text{mm/min}$ Ferramenta 3 c/  $va = 0.4\text{mm/min}$ Ferramenta 4 c/  $va = 0.1\text{mm/min}$ Ferramenta 4 c/  $va = 0.4\text{mm/min}$ Ferramenta 3 c/  $va = 0.2\text{mm/min}$ Ferramenta 1 c/  $va = 0.2\text{mm/min}$ Ferramenta 4 c/  $va = 0.8\text{mm/min}$ Ferramenta 1 c/  $va = 0.8\text{mm/min}$ 

Figura 5.19. Presença de rebarbas em furos realizados em aço inox, variação de ferramentas e de velocidade de avanço



## CAPÍTULO 6

# METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

---

A metodologia experimental aqui utilizada para medição de tensões residuais com holografia eletrônica, HE, é composta de duas etapas: a obtenção dos dados experimentais e o processamento destes dados.

A seguir é feita uma breve exposição dos princípios da HE e das duas etapas da metodologia proposta.

### 6.1. PRINCÍPIOS DA HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

A holografia eletrônica (HE), como a holografia clássica, é utilizada para medição de micro-deslocamentos. Ambas as técnicas envolvem princípios interferométricos e utilizam a luz monocromática e coerente de um laser [61, 75, 76, 77].

Na holografia eletrônica de dupla iluminação a peça a medir é iluminada simultaneamente por dois feixes do mesmo laser. A superposição destes dois feixes na superfície da peça dá origem a um padrão luminoso de aspecto granular denominado de padrão de “speckle”, que é captado por meio de uma câmera de TV. À medida que a peça a medir experimenta um campo de deslocamentos, há alterações nos caminhos ópticos percorridos pelos raios de luz de cada feixe até interferir com o outro o que dá origem à alteração da fase relativa do padrão de “speckle”, cujo efeito visual é a alteração do seu aspecto, fazendo com que pontos que eram inicialmente brilhantes tornem-se ou não escuros e vice-versa, dependendo do valor e direção do deslocamento daquele ponto. A câmera de TV é capaz de captar e, através de algoritmos apropriados, evidenciar estas alterações, dando origem às franjas de interferência.

Para realizar uma medição com HE, o feixe de laser é dividido em dois ramos, através de um espelho parcial ou prisma divisor (Figura 6.1.). Os dois ramos de luz são direcionados para a peça, ( superfícies 1 e 2 da Figura 6.1.), de forma que os fotoelementos da câmera de vídeo captam intensidades aproximadamente iguais de cada ramo. Analisando um único ponto da superfície da peça, ou um fotoelemento isolado, pode-se dizer que caso a diferença de fase da luz proveniente de cada um dos dois ramos seja um ângulo cônico de  $0^\circ$ , o resultado é a interferência construtiva, se a diferença é um ângulo cônico de  $180^\circ$  resulta em interferência totalmente destrutiva. Para outros valores de diferença de fase, a intensidade resultante estará entre as duas anteriores.

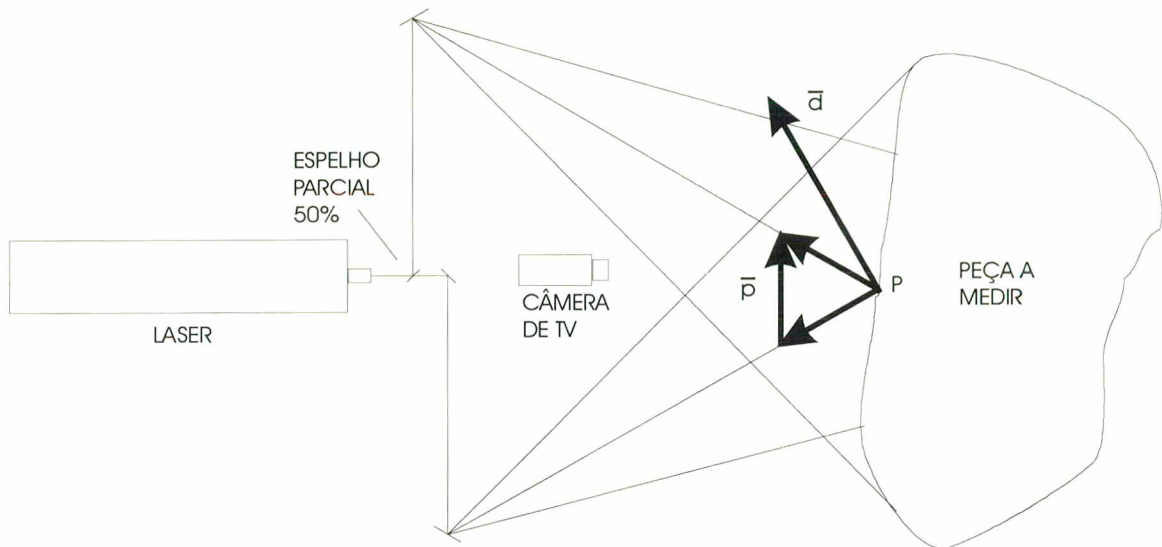


Figura 6.1. Diagrama esquemático do princípio da HE.

### 6.1.1. INTERFEROMETRIA SPECKLE

#### O SPECKLE

Os "speckles" podem ser facilmente vistos olhando-se uma superfície iluminada pela luz monocromática e coerente do laser. O aspecto visual desta superfície é caracterizado pela presença de inúmeros pontos claros, escuros e de intensidades intermediárias - os "speckles" - também conhecidos por "granulado óptico". Os "speckles" são formados pela interferência dos inúmeros raios do laser refletidos de forma desordenada da superfície rugosa da peça. Como o fenômeno da interferência localizada da luz ocorre de forma diferente para cada ponto da peça, a visão macroscópica da luz refletida pela superfície apresenta-se com a textura granular formada por pontos de intensidade diferentes, os "speckles" (Figura 6.2.).

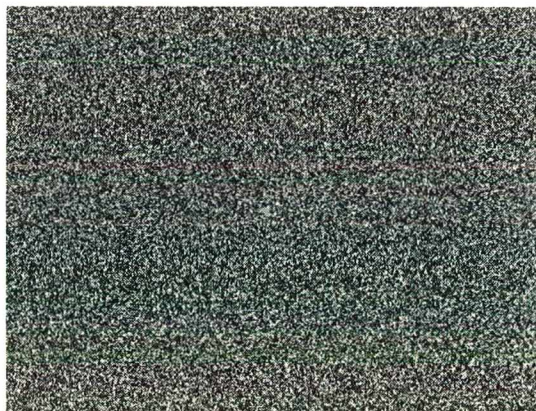


Figura 6.2. Padrão de "speckles" típico.



## A INTERFEROMETRIA SPECKLE

Quando a superfície da peça é iluminada apenas pelo 1º. ramo do laser ela fica sujeita a um campo de “speckles” com uma distribuição de intensidade que pode ser expressa pela seguinte função:

$$I_1 = I_1(x, y) \quad (6.1)$$

Quando a superfície é iluminada apenas pelo 2º ramo origina-se um segundo campo de “speckles” com a distribuição de intensidade dada por outra função:

$$I_2 = I_2(x, y) \quad (6.2)$$

Quando a superfície é iluminada simultaneamente pelos dois ramos ao mesmo tempo ocorre a interferência entre os dois campos de “speckles” o que resulta em uma terceira distribuição de “speckles” - mapa de speckle interferométrico - distinto dos dois anteriores, que é capturada pela câmera de vídeo na forma de distribuição de intensidades. A intensidade do campo de “speckles” interferométrico é dada pela seguinte expressão:

$$I_i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \quad (6.3)$$

onde:  $\Delta\varphi = \Delta\varphi(x, y)$  é a diferença de fase entre os campos de “speckles” 1 e 2;

$I_i = I_i(x, y)$  intensidade do campo de “speckles” interferométrico numa condição inicial.

O padrão de “speckles” interferométrico é um sinal de frequência espacial baixa, o suficiente para ser registrado por fotossensores comuns utilizados pelas câmeras de vídeo comerciais.

Além da iluminação dupla da mesma superfície, é possível obter um padrão de “speckle” interferométrico superpondo opticamente duas imagens de duas superfícies distintas, cada qual com iluminação simples. Estas duas situações são ilustradas nas Figuras 6.3. e 6.4.

A distribuição de intensidades de luz do campo de “speckles” interferométrico, quando a peça está no estado inicial de carregamento, é digitalizada por uma placa de processamento de imagens, de um computador hospedeiro, para posterior processamento e comparação com a distribuição de intensidade luminosa refletida pela superfície da peça quando esta apresenta-se no estado deformado, constituindo o campo de “speckles” interferométrico no estado deformado.

Quando o objeto é deformado, os deslocamentos da superfície do objeto provocam mudanças de fase da luz refletida pelo objeto, que por sua vez modificam a fase do padrão de “speckles” interferométrico, tanto na configuração de iluminação simples como na configuração de iluminação dupla.

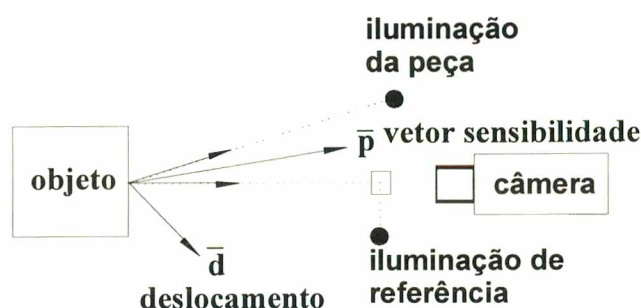


Figura 6.3. Diagrama esquemático da técnica de iluminação simples.

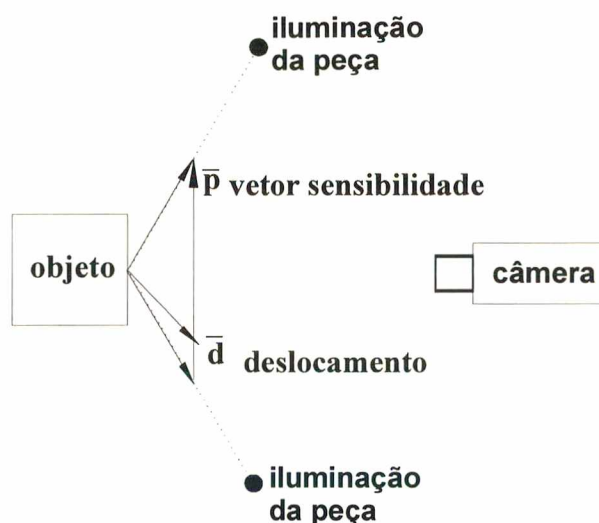


Figura 6.4. Diagrama esquemático da técnica de iluminação dupla.

O campo de deslocamentos experimentado pela superfície da peça a medir provoca alteração na fase da luz, o que altera a intensidade do mapa de “speckles” interferométrico de  $I_i$  para  $I_f$ .  $I_f$  pode ser calculado por:

$$I_f = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi + \delta) \quad (6.4)$$

onde  $\delta = \delta(x,y)$  é a alteração de fase do speckle devido ao micro-deslocamento da superfície.

A alteração da fase do speckle além de depender da intensidade e direção do campo de micro-deslocamento da superfície também é dependente da configuração de montagem experimental, ou seja, das posições dos pontos de iluminação e dos pontos de observação, e do comprimento de onda da luz do laser. Normalmente as técnicas interferométricas se referem a uma entidade conhecida como vetor sensibilidade que, no caso da HE, define a direção segundo a qual a medição é efetuada. Conforme a direção, a orientação e a magnitude do vetor sensibilidade, altera-se a forma e a quantidade das franjas resultantes de um mesmo campo de deslocamentos da superfície analisada [78].



### 6.1.2. MAPA DE FRANJAS

Para extrair informações sobre os deslocamentos da superfície são necessários vários estágios de processamentos com as imagens. O processamento inicial das imagens envolve a subtração das imagens dos padrões de "speckle" interferométrico inicial e final. Ou seja, o sinal a ser processado para o cálculo de deslocamentos, deformações e obtenção do campo de tensões é obtido pela subtração do padrão de "speckles" interferométrico deformado do indeformado:

$$I_{SUBT} = I_i - I_f = 2\sqrt{I_1 I_2}(\cos(\Delta\varphi) - \cos(\Delta\varphi + \delta)) \quad (6.5)$$

A equação anterior pode ser rearranjada em:

$$I_{SUBT} = 4\sqrt{I_1 I_2}(\sin(\frac{\Delta\varphi}{2})\sin(\Delta\varphi + \frac{\delta}{2})) \quad (6.6)$$

Como os micro-deslocamentos ou deformações da superfície dão origem a funções contínuas ( $u(x,y)$  e  $\varepsilon(x,y)$ ), o  $\delta = \delta(x,y)$  também é uma função contínua. O termo  $I_{sub}$ , apesar de sofrer influência local da aleatoriedade do campo de "speckles", apresenta-se influenciado, ponto a ponto, pelo seno desta função contínua. Ou seja, o resultado da subtração são imagens contendo muito ruído onde a informação útil apresenta-se sob a forma de franjas representativas de pontos de igual deslocamento de fase. Estas franjas, são indicativas dos pontos de igual deslocamento e por isso se assemelham a curvas de níveis de mapas topográficos (Figura 6.5.). A cada franja escura está associado um número inteiro conhecido por ordem de franja (OF). Para as demais regiões da imagem a ordem de franja é um número não inteiro.

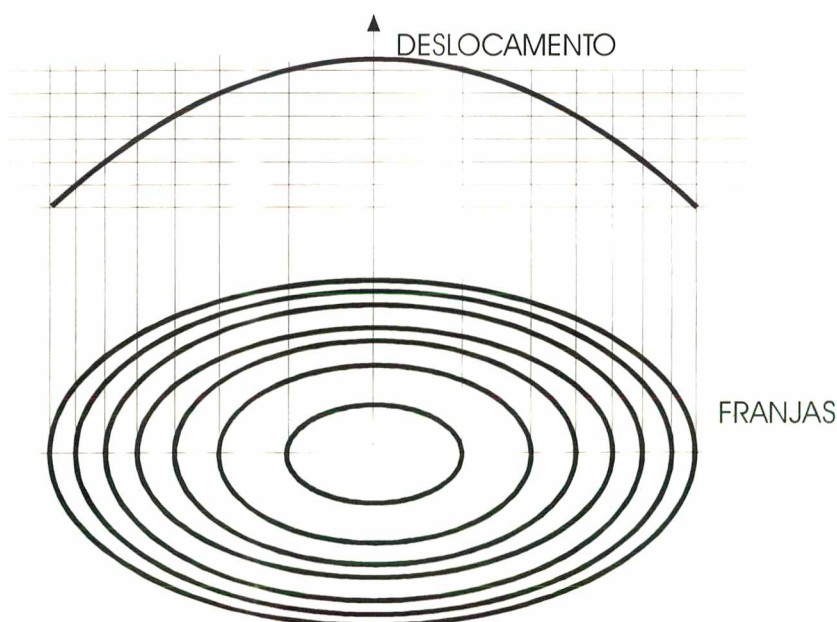


Figura 6.5. Mapa de franjas e analogia com curvas de níveis.

Os padrões de franjas originados em HE são similares aos obtidos com holografia interferométrica clássica, porém com muito mais ruído causado pela presença aleatória de “speckles”. Por esta razão a visualização e a localização exata das regiões onde as ordens de franjas são inteiras é limitada. A análise pode ficar severamente prejudicada para uma imagem que contenha um número maior do que vinte franjas, isto considerando um fotodetector formado por uma matriz de 300X500 fotoelementos (“pixels”).

### 6.1.3. CÁLCULO DOS DESLOCAMENTOS ATRAVÉS DAS ORDENS DE FRANJAS

O valor da ordem de franja (OF) para cada ponto de interesse sobre a imagem deve ser determinado e, através de uma equação vetorial, relacionado com o deslocamento medido por [79, 80]:

$$\vec{p} \cdot \vec{d} = \lambda OF \quad (6.7)$$

onde:  $\vec{p}$  é o vetor sensibilidade;  
 $\vec{d}$  é o vetor deslocamento;  
 $OF$  é a ordem de franja;  
 $\lambda$  é o comprimento de onda da luz do laser.

A equação que correlaciona a ordem de franja com a fase é dada por:

$$OF(x, y) = \frac{\delta(x, y)}{2\pi} \quad (6.8)$$

No caso geral, para determinar completamente o vetor deslocamento são necessárias, no mínimo, três configurações de iluminação diferentes. A alteração da posição de iluminação modifica o vetor sensibilidade e a OF de cada ponto para o mesmo campo de deslocamentos, o que fornece informações suficientes para a determinação das três componentes que compõem o vetor deslocamento no espaço.

No entanto, se a direção do deslocamento é conhecida a priori, apenas uma condição de iluminação é suficiente para a plena determinação do deslocamento em cada ponto.

### 6.1.4. MAPA DE FASES

Uma das técnicas mais usadas para determinar a OF é a técnica de deslocamento de fase (Phase Shifting) [81]. A técnica consiste em deslocar a fase, de um dos ramos de iluminação, aumentando ligeiramente seu caminho. Com a utilização desta técnica, pode-se determinar a ordem de franja com resolução em torno de  $OF/50$  [82].



Um mapa de fases pode ser obtido a partir da aplicação da técnica de deslocamento de fase sobre o padrão de “speckles” interferométrico original. Para isto, quatro imagens do mesmo padrão de “speckles” interferométrico, com a fase da luz deslocada artificialmente de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ , são combinadas [83, 84]:

$$\begin{aligned} I_0 &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi) \\ I_{90} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + 90^\circ) \\ I_{180} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + 180^\circ) \\ I_{270} &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi + 270^\circ) \end{aligned} \quad (6.9)$$

O deslocamento da fase da luz, portanto a defasagem de  $90^\circ$ , entre os mapas de “speckles” interferométricos pode ser obtido pelo deslocamento de um dos ramos de iluminação usando um simples espelho, ou por outras técnicas que utilizam cristais líquidos ou variam o caminho óptico pela introdução de placas de vidro de espessura diferente.

Os valores de intensidade dos quatro padrões de speckle interferométricos, obtidos pela técnica de deslocamento de fase, dados pela expressão anterior, podem ser usados para calcular a fase local de cada “pixel” pela seguinte expressão:

$$\varphi = \arctg \frac{(I_{270} - I_{90})}{(I_{180} - I_0)} \quad (6.10)$$

A OF para cada ponto da imagem pode ser obtida na situação indeformada e outro na situação deformada, lembrando que a cada  $360^\circ$  em termos de fase corresponde a uma ordem de franja. Assim:

$$\Delta\varphi(x, y) = \varphi_i(x, y) - \varphi_f(x, y) \quad (6.11)$$

O resultado da subtração é conhecido como “mapa de fases da diferença” (Figura 6.6.).

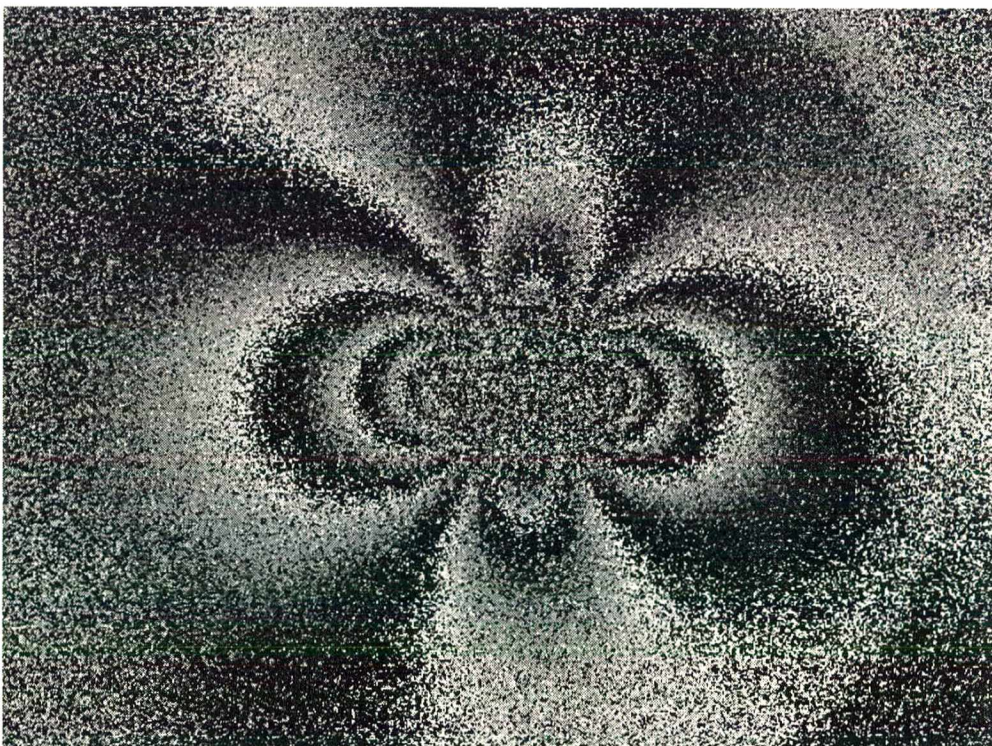


Figura 6.6. Mapa de fases da diferença (medição de tensões residuais com interferômetro radial).

## 6.2. INTERFERÔMETRO RADIAL

Neste trabalho será utilizado um interferômetro de dupla iluminação, especialmente concebido para medir a componente radial do campo de deslocamentos. Esta é uma concepção naturalmente apropriada para uso junto com o método do furo (Figura 6.7) [85].

Na superfície medida pelo interferômetro radial, cada ponto da superfície da peça recebe dois feixes do laser, incidentes segundo ângulos de  $-60^\circ$  e  $+60^\circ$  em relação à normal e direcionados de forma radial, de forma a resultar um vetor sensibilidade orientado na direção do raio. O deslocamento de fase é obtido fixando-se rigidamente um dos anéis e deslocando o outro através de um elemento piezoelétrico. Assim cada ponto da superfície iluminada pelo laser é sensível aos deslocamentos radiais que ocorrem ao redor do furo. Esta configuração permite aplicar as mesmas técnicas de obtenção de mapas de fase da holografia eletrônica convencional.

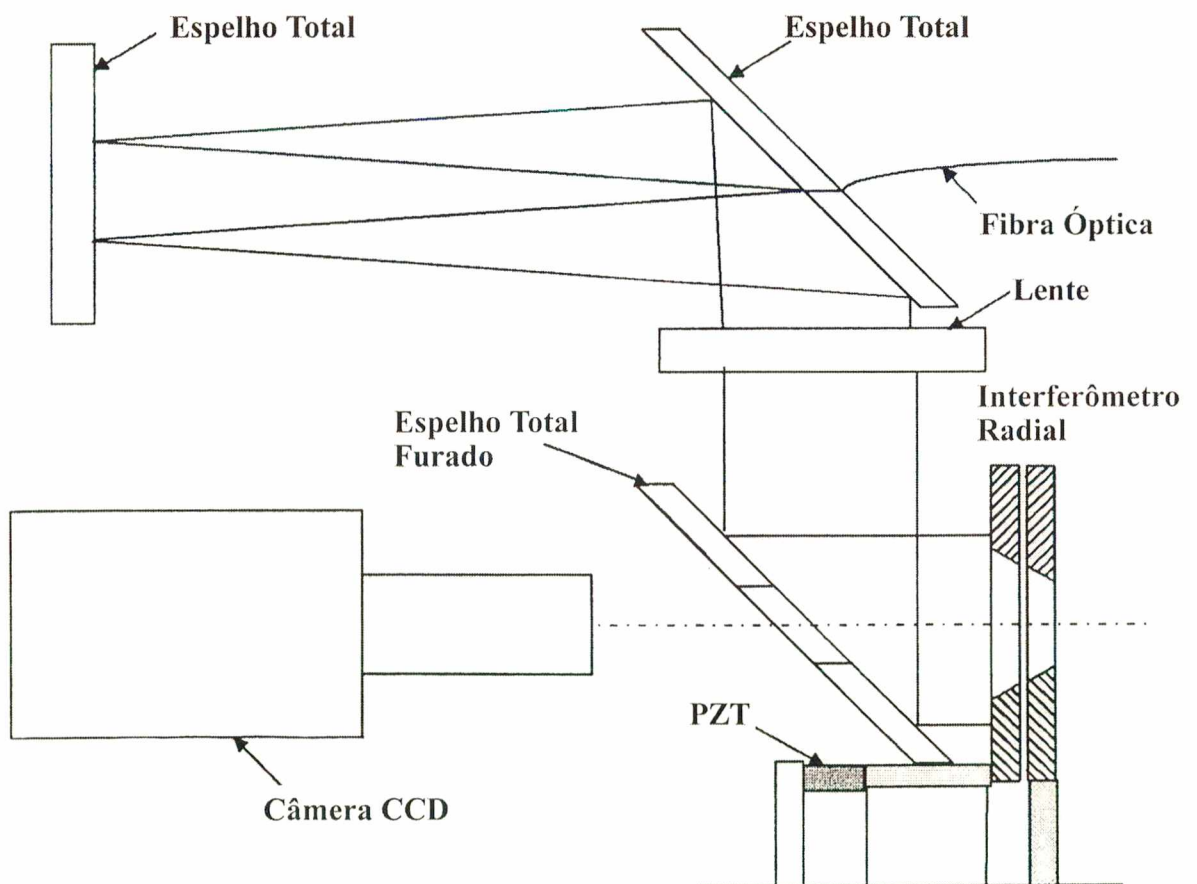


Figura 6.7. Esquema do interferômetro radial experimental [86].



### 6.2.1. BANCADA EXPERIMENTAL

Os espelhos do interferômetro radial foram produzidos a partir da usinagem de uma superfície cônica interna em um bloco formado por cinco fatias cilíndricas rigidamente unidas, feitas de alumínio de alta usinabilidade. Primeiramente o bloco foi furado e em seguida foi feito o torneamento cônico interno. A porção útil do espelho cônico é formada apenas por dois anéis internos, sendo que os dois anéis externos possuem a função de absorver as bordas arredondadas do processo de usinagem e o anel central a função de propiciar a separação adequada entre eles. O acabamento da superfície foi melhorado com processo de polimento manual e com a deposição de nova camada de alumínio por processo de evaporação em alto vácuo. Também foram fabricados espelhos em substrato de cristal, porém, o acabamento obtido no processo de polimento após o processo de lapidação não apresentou-se eficiente e a camada de alumínio depositada por processo de alto vácuo revelou irregularidades existentes no substrato.

Na montagem utilizada, a luz do laser é direcionada até o interferômetro radial através de uma fibra óptica monomodo associada a um conjunto de espelhos e lentes cuja função é a de expandir o feixe de luz e de colimá-lo de forma suficiente a atingir totalmente os dois espelhos cônicos. A região central do feixe colimado é desviada da montagem utilizando-se um espelho contendo um furo correspondente ao diâmetro interno do espelho cônico para evitar iluminação tripla sobre a superfície a medir. A intensidade do feixe de laser deve ser regulada de forma a não obter saturação da câmera. A superfície da peça também precisa ser tratada de forma a refletir difusamente a luz incidente do laser, para isto torna-se necessário o uso de tinta branca fosca.

### 6.2.2. SINAL DE MEDIÇÃO

Primeiramente obtém-se, pelo processo de deslocamento de fase, o mapa de fase inicial da região a ser furada. Para cada novo incremento de furação, obtém-se o mapa de fase correspondente.

Os mapas de fases da diferença entre o mapa de fase de cada incremento e o mapa de fases inicial, fornecem o sinal de medição de cada incremento. Estes mapas de fases da diferença possuem grande quantidade de ruído que deve ser minimizado. A posterior quantificação do campo de tensões exige que se conheça perfeitamente o valor da profundidade de cada incremento.

### 6.2.3. TRATAMENTO DAS IMAGENS

Cada mapa de fases da diferença apresenta níveis consideráveis de ruído que devem ser reduzidos por processo de filtragem. O procedimento normal tem sido o de aplicar filtros passa baixas no plano de Fourier [146].

Com a aplicação de filtros de Fourier bidimensionais para toda a imagem pode-se selecionar a banda passante do espectro de frequências com máscaras elípticas ou circulares e assim eliminar o ruído de alta frequência característico associado ao padrão de “speckles” (Figura 6.8).

### 6.2.4. AMOSTRAGEM DO SINAL - ALGORITMO DO MÍNIMO GRADIENTE DE FASE

Os deslocamentos registrados pelo interferômetro radial devem ser quantificados em um número suficiente de pontos ao redor do furo para viabilizar a determinação das tensões e direções principais. Algoritmos baseados em dados redundantes tornam os resultados menos suscetíveis a erros aleatórios.

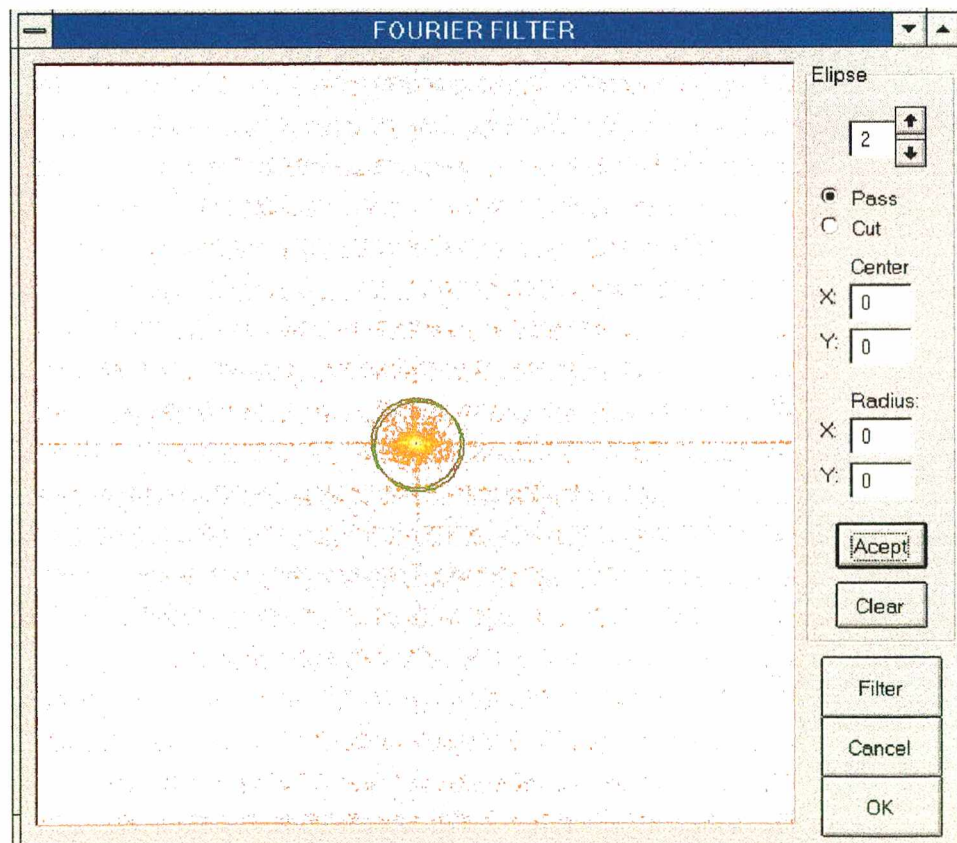


Figura 6.8. Filtragem no plano de fourier, software de medição de tensões residuais [87].



A discretização dos dados ocorre ao longo de nós sobre os anéis imaginários concêntricos com o centro óptico do espelho cônico e idealmente com o centro do furo executado. Esta condição minimiza a ação de várias fontes de erros no processo de quantificação das tensões residuais.

A quantidade de nós (pontos de amostragem) por anel, o número e o diâmetro dos anéis podem ser variados para cada ensaio, de acordo com as características do mapa de fase obtido no ensaio. Os nós (pontos de discretização) em cada anel de amostragem são regularmente espaçados (Figura 6.9.).

A discretização e a remoção do salto de fase são baseadas em um algoritmo, denominado algoritmo do “mínimo gradiente de fase”, que percorre cada nó de interesse na imagem de forma sequencial.

O percurso seguido entre dois nós consecutivos (origem e destino) é determinado pela combinação de dois fatores independentes: a direção e o menor gradiente, i.é. o caminho que envolva a mínima mudança de fase entre pontos adjacentes. Este último fator garante que pixels espúrios sejam evitados, portanto a imagem não necessita passar por filtros passa-baixas muito fortes, o que poderia distorcer as franjas. Quando o algoritmo atinge a meta, i.é., o destino, é imposta nova meta ficando o nó atual no lugar da origem e o próximo nó o destino e assim por diante. O processo continua até que seja realizada uma volta completa ao redor do anel.

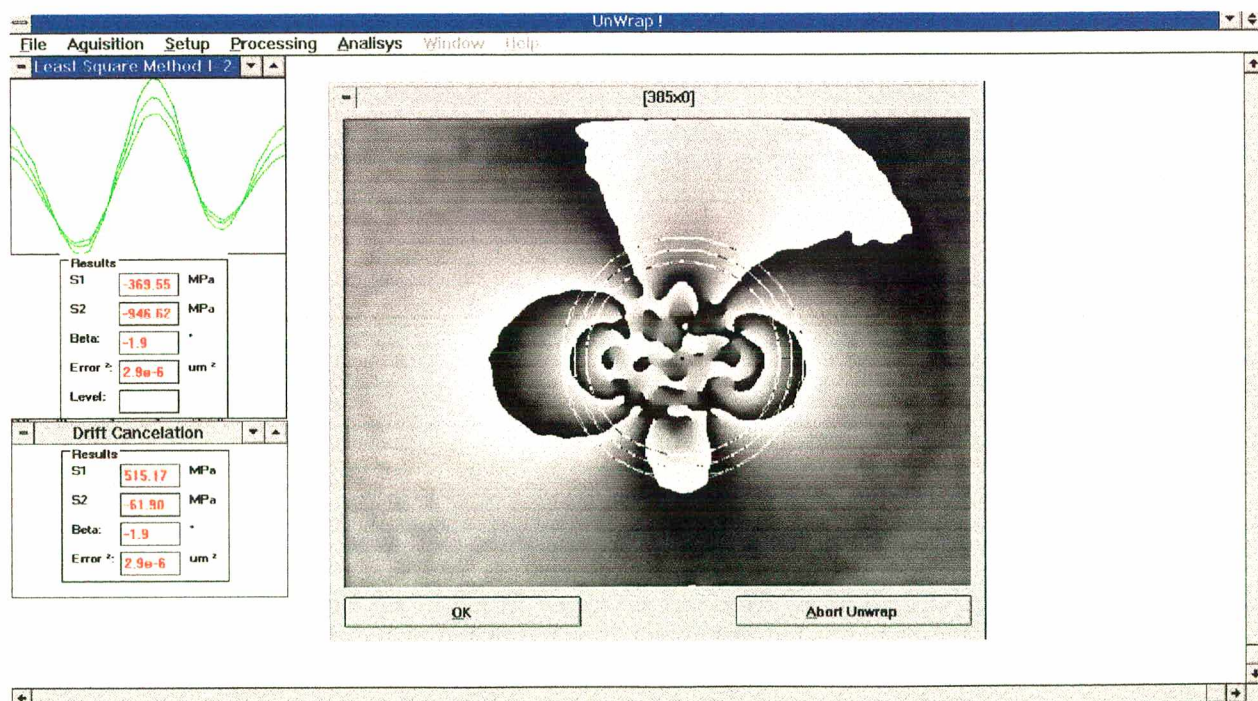


Figura 6.9 Amostragem do sinal de medição, tela do software mater [87].

Durante este processo o salto de fase é removido e os dados resultantes são convenientemente armazenados. Nesta etapa são feitos alguns testes de redundância que confirmam a boa consistência dos dados amostrados. O teste mais importante é o de anel fechado, ou seja, a informação de fase removida obtida para o último ponto deve ser a mesma do primeiro ponto do anel, já que na verdade são o mesmo ponto. Outro teste verifica se esta condição se repete quando o anel é percorrido em sentido inverso.

Com a discretização gera-se uma matriz de informação sobre a posição e a fase de cada nó amostrado. A informação de fase pode ser transformada em deslocamento aplicando a equação Fundamental de Holografia (eq.6.7). Com o deslocamento, o raio e o ângulo de cada ponto amostrado pode-se utilizar do método dos mínimos quadrados e a solução de Kirsch adaptada para furo cego como forma de calcular o campo de tensões residuais.

#### 6.2.5. ERROS DEVIDO A DESCENTRAGEM

O interferômetro radial mede diretamente o deslocamento radial provocado pelo alívio das tensões em torno do furo. No entanto não está livre de perturbações de deslocamento de corpo rígido e flutuações de níveis de fundo. Para poder quantificar corretamente os níveis de tensões residuais presentes no componente em análise foram criados alguns algoritmos que consideram estas perturbações e o método de Kirsch corrigido para o caso de furo cego.

As perturbações devido ao deslocamento de corpo rígido e as flutuações de níveis de fundo se tornam mais críticas quando o furo é usinado de forma excêntrica em relação ao centro óptico do espelho. Para verificar estas situações críticas, foram simuladas duas condições de excentricidade do furo com relação ao centro óptico do espelho. Uma na direção x e outra na y - e duas possibilidades de amostrar os dados, amostragem centrada no centro do espelho e amostragem centrada no centro do furo. Estas condições originaram quatro situações: (1) excentricidade de 0.5mm na direção x e amostragem centrada no centro óptico do espelho =  $E_{cX}/\text{Espelho}$ , (2) excentricidade de 0.5mm na direção y e amostragem centrada no centro óptico do espelho =  $E_{cY}/\text{Espelho}$ , (3) excentricidade de 0.5mm na direção x e amostragem centrada no centro do furo =  $E_{cX}/\text{Furo}$  e (4) excentricidade de 0.5mm na direção y e amostragem centrada no centro do furo =  $E_{cY}/\text{Furo}$ , (Figura 6.10.). A tabela da Figura 6.10. mostra claramente que na presença de deslocamentos de corpo rígido e anéis de amostragem concêntricos com o furo resultam em erros de até 50 MPa e que realizando anéis de amostragem concêntricos com o centro óptico do espelho, estes erros caem pelo menos 10 vezes [88].



Parâmetro/ Amostragem	Excentricidade Simulada [mm]	Raio de Amostrag.=2*R0			Raio de Amostras. = 3*R0		
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\beta$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\beta$
(1) EcX/Espelho	0.5	-3.0	+3.0	-0.2	-1.3	+1.3	-0.1
(2) EcY/Espelho	0.5	+3.5	+3.5	+0.2	-1.5	+1.5	+0.1
(3) EcX/Furo	0.5	+34.3	+48.3	+5.0	+35.1	+47.6	+4.8
(4) EcY/Furo	0.5	-13.4	+12.6	-3.2	-12.2	+11.7	-3.1

Figura 6.10. Resultados de simulação de erros com furo excêntrico com relação ao espelho [88].

6.2.6. CORREÇÃO DA CENTRAGEM

Como visto anteriormente, o anel de amostragem deve estar centrado no eixo óptico do interferômetro para minimizar distorções no sinal amostrado, o que gera erros nas tensões calculadas. A determinação da posição do centro por critérios unicamente visuais na própria imagem, na prática, não tem se mostrado suficiente para evitar que níveis de erros de até 10 MPa estejam presentes. Um algoritmo para a determinação automática do centro do espelho do interferômetro foi desenvolvido.

Um campo de deslocamentos de corpo rígido é artificialmente introduzido na superfície da peça a medir. Deslocamentos de corpo rígido da ordem de 0,5 a 1,0  $\mu\text{m}$  são suficientes. Como consequência, um padrão de franjas característico é produzido (Figura 6.11.). Se o anel de amostragem estiver no centro do interferômetro, o segundo harmônico do sinal amostrado se anulará. Caso haja erro de centragem, o valor do segundo harmônico indicará a presença deste erro e poderá ser usado para sua correção.

A amplitude do vetor de correção pode ser calculada por:

$$Ac = 2R_a \frac{S_2}{S_1}$$

(6.12)

onde:

- $R_a$  é o raio do anel de amostragem,
- $S_1$  e  $S_2$  são as amplitudes do primeiro e segundo harmônicos, respectivamente, medidas no anel de amostragem.



A direção em que o vetor correção deve ser aplicado é dada pela diferença dos ângulos de fase entre o segundo e primeiro harmônico. Este algoritmo converge geralmente em duas ou três iterações.

### 6.3. QUANTIFICAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

As incógnitas do processo de medição são as duas tensões principais e o ângulo principal. A rigor, deslocamentos medidos em três pontos fornecem as três equações suficientes para a determinação destas incógnitas. Como se dispõe de inúmeras medições de deslocamentos radiais ao redor do furo pode-se utilizar técnicas específicas para utilizar as informações redundantes em favor de reduzir as incertezas no cálculo destas quantidades.

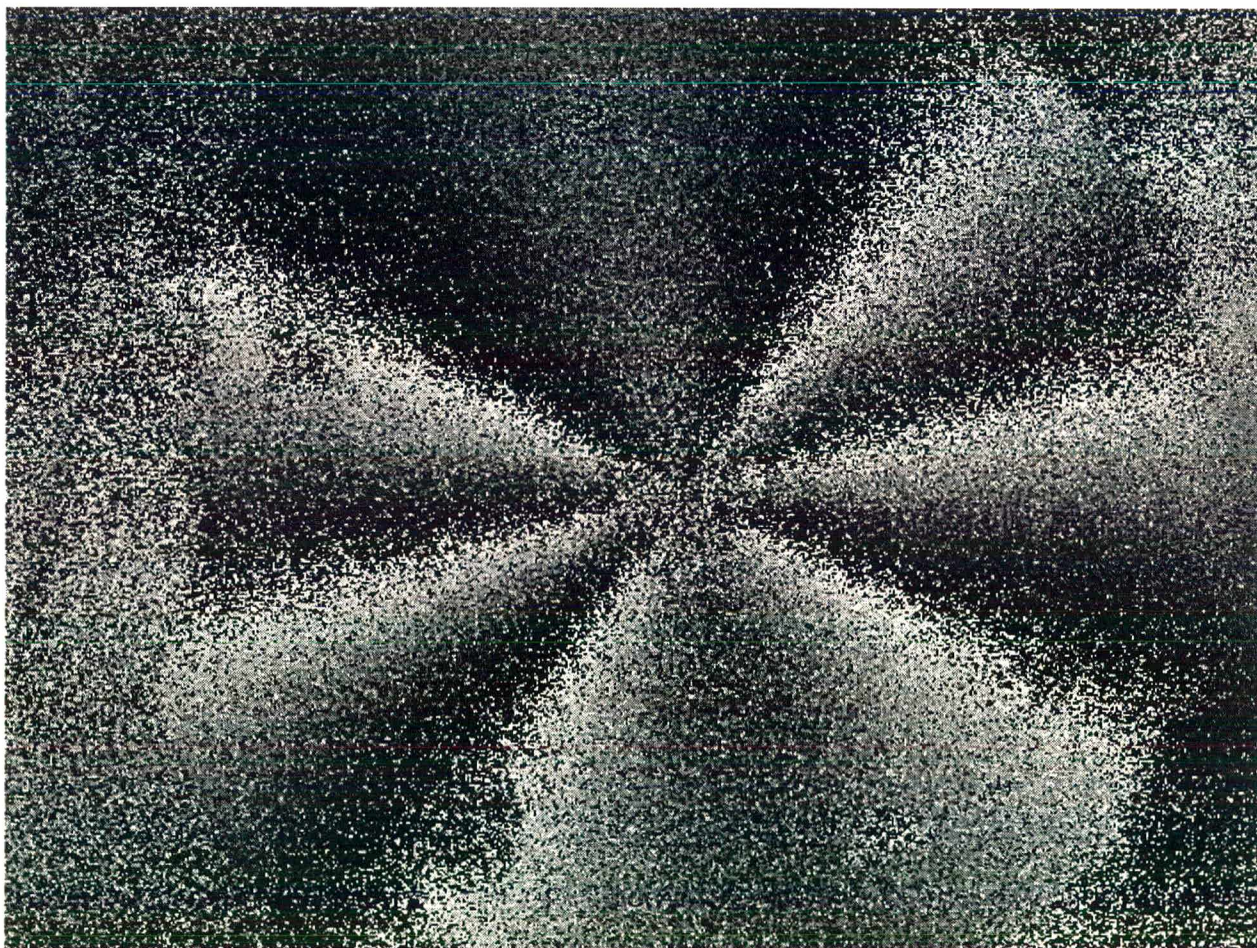


Figura 6.11. Padrão de franjas típicos de deslocamento de corpo rígido.



### 6.3.1 ALGORÍTMO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

O método dos mínimos quadrados - MMQ - pode ser utilizado para determinar valores para as tensões residuais e direções principais de forma a minimizar o erro quadrático formado pelo somatório dos quadrados dos erros entre os deslocamentos experimentalmente medidos e os valores calculados pela equação que representa a solução de Kirsch modificada para o furo cego:

$$EQ = \sum_{i=1}^n \{u_r^*(r_i, \theta_i) - A(r_i)(\sigma_{R1} - \sigma_{R2}) \cos(2\theta_i - 2\beta_R) + B(r_i)(\sigma_{R1} + \sigma_{R2})\}^2 \quad (6.13)$$

onde:

EQ é o erro quadrático total

n é o número de pontos onde o deslocamento foi medido

$u_r^*(r_i, \theta_i)$  é o deslocamento do i-ésimo ponto medido

A minimização é efetuada através da solução do sistema de equações não lineares obtido igualando a zero as derivadas da expressão do erro quadrático em relação a  $\sigma_{R1}$ ,  $\sigma_{R2}$  e  $\beta_R$ .

Este algoritmo não exige que os pontos onde deslocamentos são medidos estejam regularmente dispostos. Esta é uma característica positiva, especialmente por permitir que dados oriundos de regiões de má qualidade na imagem não precisem ser considerados nos cálculos. Outro fator positivo é que a presença de deslocamentos de corpo rígido não afeta os valores calculados para as tensões residuais.

### 6.3.2. ALGORÍTMO DOS HARMÔNICOS

O algoritmo dos harmônicos é baseado no fato de que a solução de Kirsch para o campo de deslocamentos em torno do furo cego pode ser agrupada em dois termos: O primeiro termo, associado à diferença das tensões principais, depende de  $\cos(2\theta - 2\beta_R)$  e o segundo termo contém a soma das tensões principais, não é função de  $\theta$ . Isto torna possível quantificar as tensões residuais a partir da decomposição do sinal de medição em harmônicos.

O campo de deslocamentos medido ao longo de um anel de amostragem concêntrico com o espelho, e o furo, é um sinal periódico em  $\theta$ . Seu valor médio está associado à soma das tensões principais. Dois ciclos de um sinal periódico, cuja amplitude está associada à diferença das tensões principais, estão também presentes.

Os coeficientes da série de Fourier dos harmônicos de ordem zero e de ordem dois do sinal do anel de amostragem podem ser usados para quantificar as tensões residuais  $\sigma_{R1}$  e  $\sigma_{R2}$  através da equação:

$$\begin{cases} \sigma_{R1} = \frac{1}{2} \left( \frac{S_0}{B(r_1)} + \frac{S_2}{A(r_1)} \right) \\ \sigma_{R2} = \frac{1}{2} \left( \frac{S_0}{B(r_1)} - \frac{S_2}{A(r_1)} \right) \end{cases} \quad (6.14)$$

onde:

$S_0$  é o coeficiente de Fourier para a frequência zero (termo constante)

$S_2$  é o coeficiente de Fourier para a frequência dois

$r_1$  é o raio do anel de amostragem

O valor de  $\beta_R$  é determinado através do ângulo de fase do segundo harmônico.

Pode ser mostrado que, se o anel de amostragem está bem centrado em relação ao furo e ao eixo do interferômetro, a presença de deslocamentos de corpo rígido gera um termo periódico no anel de amostragem (harmônico) com frequência unitária, o que não afeta  $S_0$  e  $S_2$  nem as tensões calculadas.

Teoricamente, dados obtidos de anéis de amostragem com diferentes raios devem levar aos mesmos valores das tensões residuais, no entanto isto não é válido quando a ordem de franja inicial não está correta e é discriminada aleatoriamente. Porém, a diferença das tensões é um ótimo indicativo dos valores das tensões residuais em cada anel, ver Figura 6.12. Esta propriedade, o valor da diferença das tensões residuais, deve ser sempre verificada para detectar a presença de efeitos inesperados como, por exemplo, plastificação localizada ou fortes gradientes de tensões residuais ao longo da superfície da peça.

### 6.3.3 ALGORÍTMO PARA COMPENSAÇÃO DO NÍVEL DE FUNDO

A medição de deslocamentos com o interferômetro radial pode ser afetada por diversas fontes de instabilidade. Perturbações de frequências mais elevadas são facilmente detectadas e devem ser eliminadas para viabilizar a medição. Há uma outra classe de instabilidade que introduz variações muito lentas, de difícil detecção. Variações de temperatura é um exemplo desta última classe.



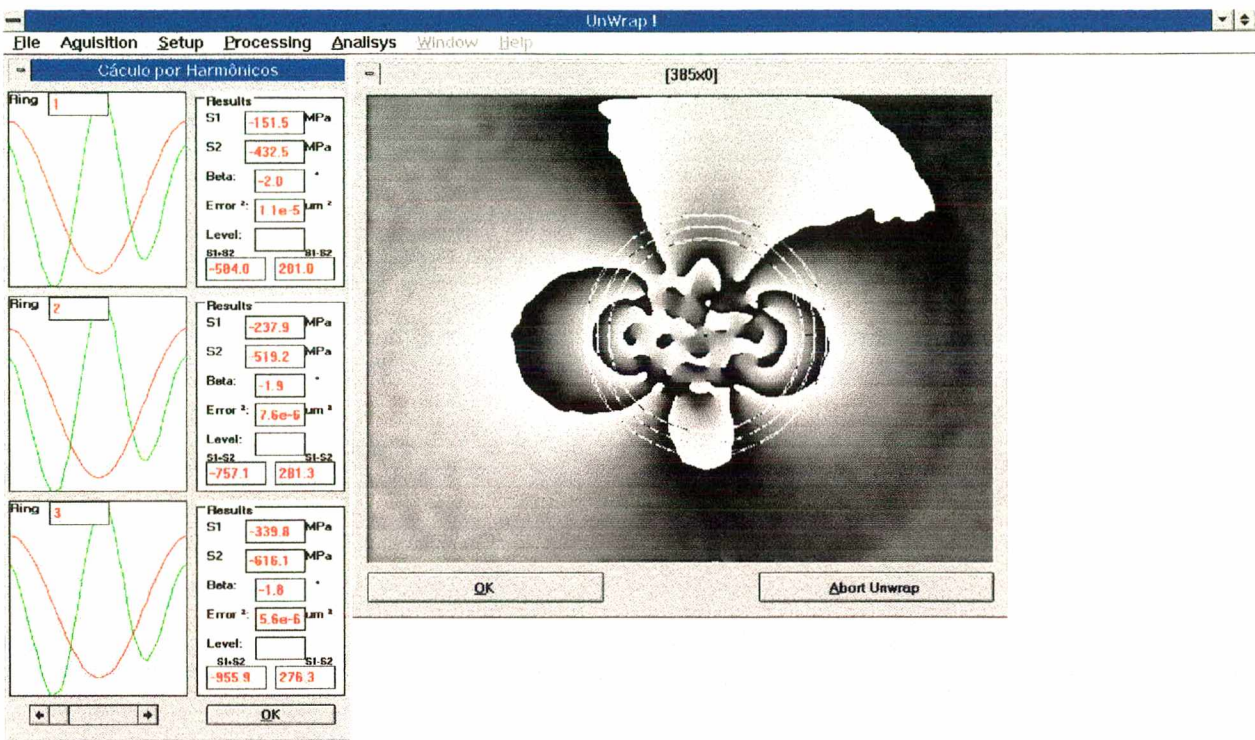


Figura 6.12. Método dos Harmônicos para verificação do sinal amostrado [87].

O efeito das instabilidade de baixa frequência sobre o campo medido é a elevação do nível de fundo do campo de deslocamentos, isto é, um termo constante é adicionado a todos os pontos medidos.

A adição de um termo constante nos deslocamentos medidos vai introduzir erros nos cálculos efetuados nos algoritmos dos harmônicos e mínimos quadrados. A soma das tensões residuais, que no algoritmo dos harmônicos é calculada pelo nível médio no anel de amostragem, sofrerá alterações. Efeitos similares também resultam no algoritmo dos mínimos quadrados.

Para conviver com a presença de um termo aditivo constante foi desenvolvido o algoritmo apresentado nesta seção. Seja acrescido ao campo de deslocamentos a constante aditiva NF (nível de fundo). Assim, a equação do campo de deslocamentos em torno do furo cego torna-se:

$$u_r(r, \theta) = A(r)(\sigma_{R1} - \sigma_{R2}) \cos(2\theta - 2\beta_R) + B(r)(\sigma_{R1} + \sigma_{R2}) + NF \tag{6.15}$$

O algoritmo discretiza dados de forma regular em pelo menos dois anéis de amostragem com raios diferentes. O valor do deslocamento médio ( $\bar{u}_r$ ) de cada anel é calculado. É possível mostrar que o valor médio da equação acima (6.15) em um anel fechado é função apenas de r e é dado por:

$$\bar{u}_r(r) = B(r)(\sigma_1 + \sigma_2) + NF \tag{6.16}$$

ou

ou

$$\bar{u}_r(r) = \frac{1+\nu}{2E} Ro^2 (\sigma_1 + \sigma_2) \frac{1}{r} + NF \quad (6.17)$$

A equação 6.17 depende do inverso do raio do anel de amostragem ( $1/r$ ) e do nível de fundo. A rigor, a equação 6.17 é do tipo:

$$\bar{u}_r(r) = K \frac{1}{r} + NF \quad (6.18)$$

sendo:

$$K = \frac{1+\nu}{2E} Ro^2 (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6.19)$$

Sendo esta equação escrita para dois anéis de amostragem, com raios distintos, é possível determinar as constantes “K” e “NF”. Se mais que dois anéis de amostragem forem envolvidos, estas mesmas constantes podem ser determinadas pelo método dos mínimos quadrados.

Uma vez determinado o valor de “K”, é possível calcular a soma das tensões residuais, independentemente do valor do nível de fundo (NF). Como a diferença das tensões residuais, determinada pelo segundo harmônico da equação (6.12), não é afetada pelo nível de fundo, a determinação de cada componente de tensão residual é efetuada com segurança.

#### 6.3.4. CORREÇÕES PARA FURO CEGO POR ELEMENTOS FINITOS

O método do furo, para medições de tensões residuais, foi desenvolvido inicialmente a partir da solução matemática de Kirsch para a concentração de tensões ao redor de um furo passante numa chapa infinita. No entanto a aplicação do método ocorre principalmente em corpos espessos o que exige um furo cego. Este furo cego não obedece ao caso de estado plano de tensões ou de deformações e portanto não pode ser aplicada a formulação desenvolvida baseada na teoria de elasticidade .

A solução para a aplicação do método do furo cego com extensometria já vem sendo adotada pela Norma ASTM 837 desde 1985 e é baseada no modelamento por elementos finitos do processo de medição e furação incremental. Os deslocamentos nodais da superfície de tal



modelamento podem ser processados para produzir coeficientes adimensionais que permitem corrigir as formulações baseadas na formulação de Kirsch.

Normalmente o modelamento por elementos finitos pode ser feito a partir de uma malha polar com cerca de 5000 nós e usando elementos de 8 nós. A primeira etapa da análise é feita numa placa sem furo e carregada com uma tensão uniforme, a partir deste modelo pode ser realizada a segunda etapa que consiste na retirada de material da região do furo. O processo de retirada de material é feito de forma simples atribuindo ao módulo de elasticidade o valor zero. Na terceira etapa é feita a subtração dos deslocamentos nodais entre as duas etapas anteriores [89]. Outra forma de modelar o problema consiste em modelar um malha contendo um furo e aplicar um carregamento nodal nos elementos que compõem a parede do furo [90, 91]. Este modelamento do furo permite simular casos onde o campo de tensões residuais varia ao longo da profundidade.

Os modelamentos utilizando elementos finitos fornecem coeficientes adimensionais dados em função da razão entre a profundidade e o diâmetro do furo para poderem ser aplicados nos casos de furação incremental. Para aplicação com holografia, onde a região de amostragem do sinal pode variar de imagem para imagem, é necessário que estes coeficientes também sejam dados em função da relação entre o raio de amostragem e o raio do furo [89]. Para o caso de extensometria estes coeficientes são dados apenas em função da relação entre a profundidade e o diâmetro do furo e do tipo de extensômetro.

Os valores adimensionais obtidos pela simulação com elementos finitos são levemente dependentes do coeficiente de Poisson, porém, esta dependência pode ser considerada negligível perante outras fontes de erros. Um erro de 10% no coeficiente de Poisson induz a um erro de 2% nas tensões residuais calculadas [89].

Os algoritmos de cálculos apresentados anteriormente utilizam destes coeficientes para quantificação das tensões residuais. Os coeficientes adimensionais estão tabelados em um arquivo para oito casos de relação de profundidade/diâmetro e dez casos de relação raio de amostragem/raio do furo, os dados foram obtidos dos gráficos apresentados na Figura 6.13. Com estas tabelas, qualquer situação compreendida entre  $h/d$  maior do que 0.1 e menor do que 2 e  $r/r_o$  maior do que 2.5 e menor do que 5, pode ser calculadas com baixos erros de interpolação dos dados.

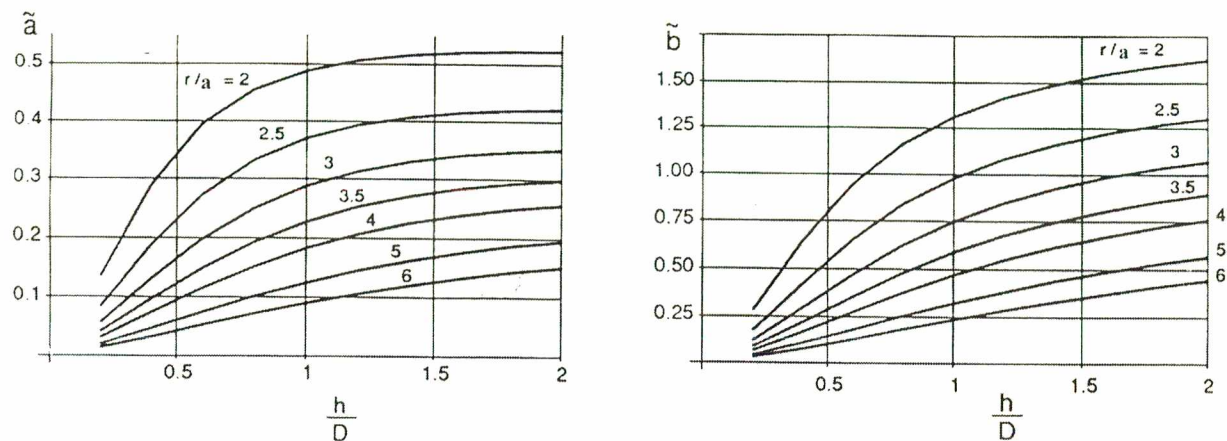
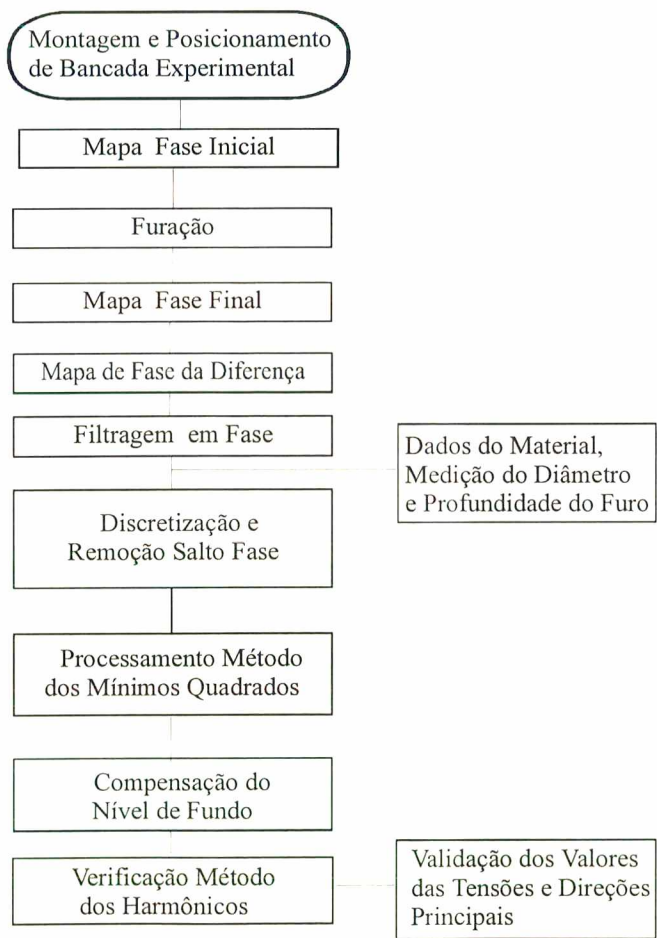


Figura 6.13. Coeficientes adimensionais obtidos por simulação em elementos finitos.

6.4. FLUXOGRAMA DO ENSAIO

Como resumo da metodologia das medições de tensões residuais com HE, o fluxograma abaixo ilustra o procedimento de ensaio.





## CAPÍTULO 7

# SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL DE CAMPOS DE TENSÕES RESIDUAIS

---

Neste capítulo, são apresentados os experimentos planejados para validação da técnica. Nos ensaios foram simulados campos de tensões residuais uniaxiais em corpos de prova de três materiais diferentes. Com estes campos de tensões, pôde-se estudar o comportamento do método do furo, acoplado a técnica de HE, na medição de tensões residuais e também validar a forma de processamento dos dados [92, 93, 94, 95].

Os campos de tensões foram obtidos através da utilização de um corpo de prova submetido a um carregamento simples, onde foi possível calcular a carga a ser aplicada e medir a efetiva solicitação do corpo de prova. Os campos de tensões foram monitorados com extensômetros posicionados nas extremidades do corpo de prova, regiões de momento fletor máximo. A realização de diversos furos para cada carregamento permitiu verificar a repetitividade do método do furo cego acoplado à HE.

A formulação empregada na análise dos dados experimentais, utiliza coeficientes adimensionais obtidos numericamente e por isto a sua validação dependeu da capacidade de gerar campos de tensões bem conhecidos.

### 7.1. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DO TIPO DE CARREGAMENTO

Na técnica do alívio mecânico pela introdução de um furo existem algumas situações consideradas críticas para a maioria das técnicas: a) devido à concentração de tensões ao redor do furo, b) devido à relação entre as tensões biaxiais no plano, c) devido à orientação das direções principais e d) devido aos campos de tensões variáveis ao longo da profundidade.

Experimentos com carregamentos biaxiais em corpos de prova cruceiformes é a forma tida como mais indicada para simular estas situações. No entanto, não foram realizados devido a dificuldade de implementar um dispositivo de carregamento biaxial.

Foram analisadas diversas formas de solicitar peças como: torção, flexão, tração e compressão, além de pressões internas ou externas em vasos. Poderiam ser criados campos de tensões com: disco sob compressão, membrana sob pressão, interferência forçada entre duas peças, placa furada sob tração, torção de barras, deformação plástica sob tração, tubos de parede fina sujeitos a carregamento axial e pressão interna ou carregamento de torção, entre outras formas. No entanto, em todos estes casos os dispositivos ou os campos de tensões gerados são complexos, variáveis no plano e ao longo da profundidade o que dificulta a utilização na validação da técnica experimental [96, 97, 98, 99, 100, 101, 102]. Considerando os motivos citados acima, adotou-se o método de tração simples como mecanismo de obter campos de tensões uniaxiais bem conhecidos.

## 7.2. DISPOSITIVO DE CARREGAMENTO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Devido à necessidade de se realizar ensaios de validação experimental, dispondo apenas dos componentes principais do sistema de medição, como sistema de iluminação radial e conjunto de furação, foi criado um dispositivo capaz de manter campos de tensões conhecidos, gerados em peças simples através de uma máquina de tração convencional ( Figura 7.1 e Figura 7.2.),

Os requisitos levados em consideração para o projeto do dispositivo foram:

- a. necessidade de realização de furo na superfície da amostra;
- b. utilização da técnica de HE e de extensometria para a realização dos ensaios;
- c. alta rigidez e estabilidade;
- d. permitir aplicar diferentes campos de tensões;
- e. ser aplicável para corpos de prova de diferentes materiais;
- f. ser pequeno podendo ser fixado na bancada óptica
- g. possibilitar a realização de vários experimentos, furos, numa mesma amostra;
- h. permitir o controle ou o conhecimento da flexão no ou fora do plano;
- i. permitir que o nível de tensões obtido possa ser determinado com baixas incertezas;
- l. força de tração máxima de 100kN.





Figura 7.1. Máquina de tração utilizada para o carregamento dos corpos de prova.

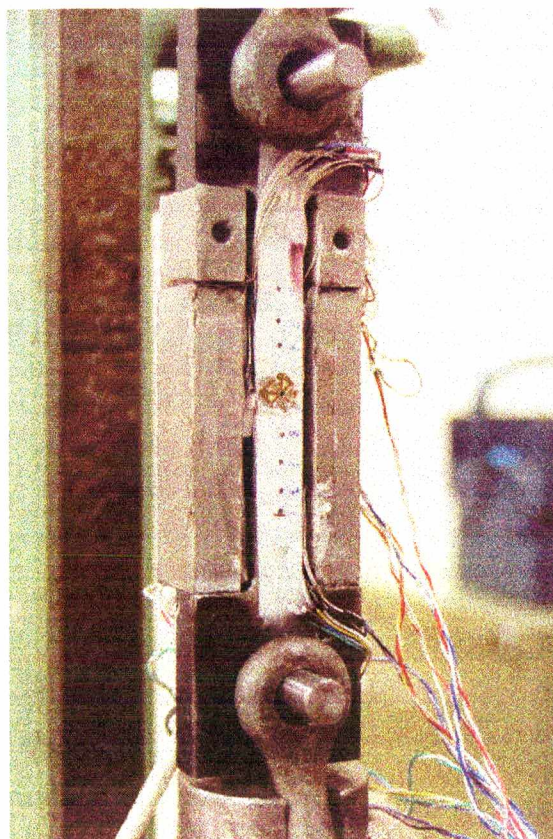


Figura 7.2. Corpo de Prova na máquina de tração e dispositivo de retenção de carga.



O dispositivo de retenção de carga utiliza um grampo interno composto por duas peças (Figura 7.2). A superfície entre as duas peças de retenção, cunha de travamento, é inclinada de forma a permitir um pequeno ajuste para absorver a deformação do corpo de prova. As superfícies inclinadas atuam também como uma cunha de auto retenção devido ao pequeno ângulo existente. O dispositivo criado possui dimensões adequadas ao trabalho no laboratório, sendo o monitoramento do campo de tensões realizado através da utilização de extensômetros de resistência posicionados de forma estratégica. Este dispositivo produziu campos de tensões suficientemente bons para a avaliação inicial da técnica.

O carregamento foi obtido com o seguinte procedimento:

- a) posicionamento do corpo de prova na máquina de tração;
- b) solicitação do corpo de prova pela máquina de tração;
- c) posicionamento das peças de retenção de carga no corpo de prova;
- d) retirada da carga da máquina de tração.

Devido à problemas de alinhamento da máquina de tração, de problemas com a usinagem dos corpos de prova e das cunhas, o carregamento obtido foi uma composição entre tração e flexão no plano e fora do plano, mas suficientemente conhecido. Almejava-se a uniformidade do campo de tensões para garantir que num primeiro estágio a simulação experimental se aproximasse de um caso idealizado de tensões constantes no plano e fora do plano.

Outro fator importante, na busca de um campo de tensões uniforme, foi a conveniência de realização de vários furos num mesmo espécime, para verificar a repetitividade do método de medição e também para reduzir o custo dos ensaios. Como não foi possível obter um campo de tração pura foram feitas considerações sobre o campo de tensão em cada ponto de medição e em cada profundidade, já que os ensaios foram feitos com furação incremental. O valor da tensão para cada ponto e profundidade foi obtido por interpolação linear baseada nas deformações dos extensômetros colados nas extremidades do corpo de prova.

### 7.3. CORPOS DE PROVA

Para a realização de simulações de campos de tensões residuais de forma confiável, os corpos de prova deveriam ter dimensões adequadas para evitar efeitos de borda e conter valores desprezíveis de tensões residuais.

Na busca de uma dimensão otimizada para os corpos de prova, foi considerada a distância mínima entre os furos e a largura mínima da peça para serem válidos os coeficientes simulados por elementos finitos e utilizados nos cálculos de tensões. Para garantir que a uniformidade do campo de tensões experimental não fosse alterado pela presença de tensões residuais no espécime, seria necessária a realização de tratamento térmico de recozimento. Desta forma, o alívio de tensões causado pela execução do furo, seria representativo apenas do campo de tensões experimental com exceção das tensões induzidas na furação.

As amostras foram fabricadas de materiais que representam parte do espectro de materiais normalmente utilizados na indústria: o aço de médio carbono ABNT 1045 ( $\sigma_e=300\text{MPa}$ ), o aço liga ABNT 4140 ( $\sigma_e=600\text{MPa}$ ), e a liga de alumínio Usinal 201 ( $\sigma_e=375\text{MPa}$ ). Foram tomados cuidados para evitar a introdução de tensões residuais, entretanto, a) a usinagem dos corpos de prova foi feita através da usinagem convencional, devido à disponibilidade limitada de equipamentos, b) a matéria prima inicial possuía apenas uma pequena camada de sobre metal e c) apenas as amostras de aço 1045 e 4140 foram submetidas a tratamento térmico de alívio de tensões, as amostras ensaiadas possuíam um nível de tensão residual inicial não desprezível.

A qualificação do nível de tensões residuais nas amostras foi realizada através de ensaios de medição de tensões residuais com a peça sem carregamento. Os baixos níveis de tensões residuais nas amostras foram comprovados apesar do fato de que os resultados representam os níveis de tensões induzidos pelo processo de furação somados ao campo de tensões residuais remanescente e as incertezas da técnica.



## 7.4. EXPERIMENTOS CONTROLADOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES UNIAXIAIS

O principal objetivo dos experimentos iniciais, foi a comparação das medições realizadas com a técnica do furo cego e HE e o carregamento medido por extensometria.

Como já apresentado anteriormente, os experimentos realizados se restringiram ao caso de campos de tensões uniaxiais, bem conhecidos. Estes experimentos possibilitaram o estudo do comportamento da técnica do furo acoplada à holografia eletrônica nas situações em que ocorre a plastificação da borda do furo e permitiram a validação do algoritmo de quantificação.

### 7.4.1 BANCADA EXPERIMENTAL DE MEDIÇÃO DO CAMPO DE TENSÕES RELATIVO AO CARREGAMENTO MECÂNICO

Experimentalmente obteve-se o valor das tensões através de uma medição cuidadosa de deformações através do uso de extensômetros de resistência. Os problemas de flexão foram reduzidos através da utilização de calços, desta forma pode-se deixar a flexão dentro de limites aceitáveis.

A leitura para determinação do carregamento e da flexão superposta foi feita através de extensômetros de resistência montados em lados opostos do corpo de prova. Os fatores que causam flexão fora do plano são os desalinhamentos entre os sistemas de aplicação de força, devido a fricção do retentor de carga com o corpo de prova e devido ao desalinhamento entre os dois.

O carregamento foi monitorado através de oito extensômetros de resistência colados a 20mm das extremidades dos corpos de prova para terem a máxima sensibilidade a presença de flexão e ao mesmo tempo estarem suficientemente distantes da região de concentração de tensões presente nas extremidades.

Todos os ensaios foram monitorados (Figura 7.3) tanto no carregamento como no descarregamento. Durante as medições foram tomados os cuidados normais como a espera para aquecimento da instrumentação, no entanto nota-se pequena diferença dos valores obtidos no carregamento quando comparados com os do descarregamento [anexo A]. Estas diferenças podem ser atribuídas a uma efetiva acomodação do carregamento como a erros de medição.



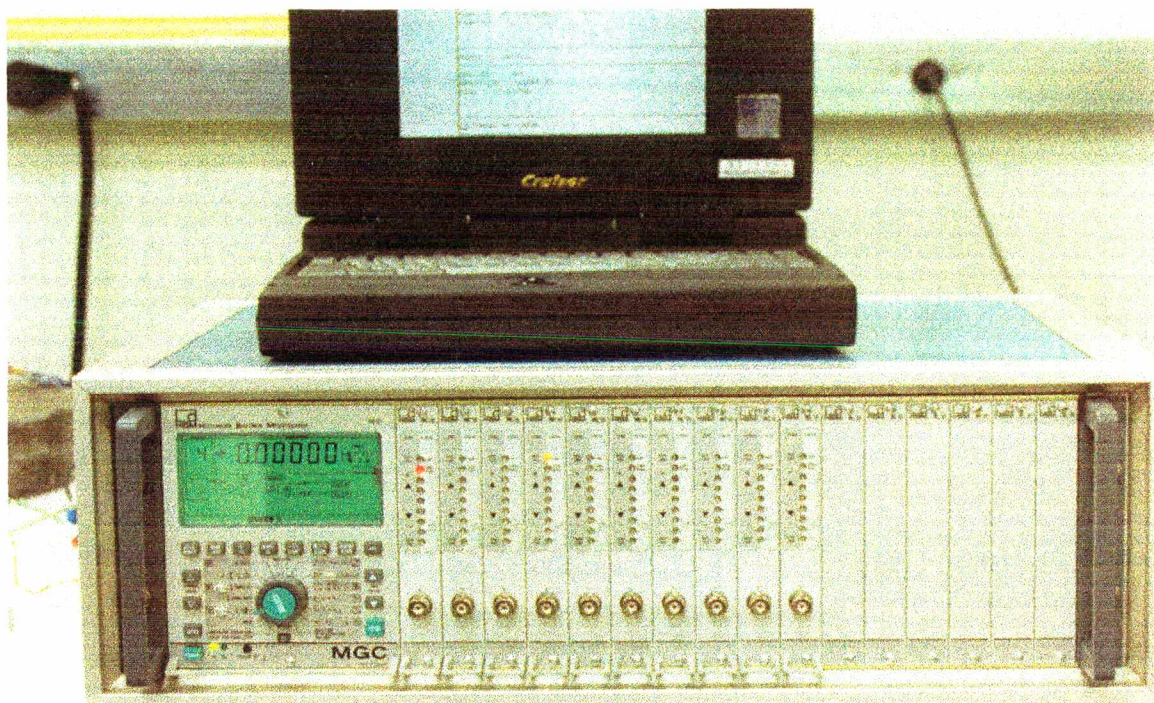


Figura 7.3. Ponte amplificadora e computador utilizados na monitoração do carregamento da máquina de tração.

#### 7.4.2. BANCADA EXPERIMENTAL DA HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

A bancada experimental é composta pelos equipamentos utilizados na holografia eletrônica e adaptada ao sistema de iluminação radial, contendo, placa de processamento de imagens, computador, drive PZT, câmera de vídeo, bancada anti-sísmica, laser, fibra óptica monomodo, sistema de acoplamento para fibra óptica, espelhos, lentes, PZT e pelos dois espelhos cônicos. Na Figura 7.4., 7.5. e 7.6. podem ser vistos boa parte destes elementos.

Para a execução do furo foi utilizada uma furadeira de altíssima rotação com mancais aerostáticos de aplicação odontológica (Figura 7.7.) e brocas especiais de aplicação na medição de tensões residuais ou brocas de aplicação dentária do modelo cônico invertido.



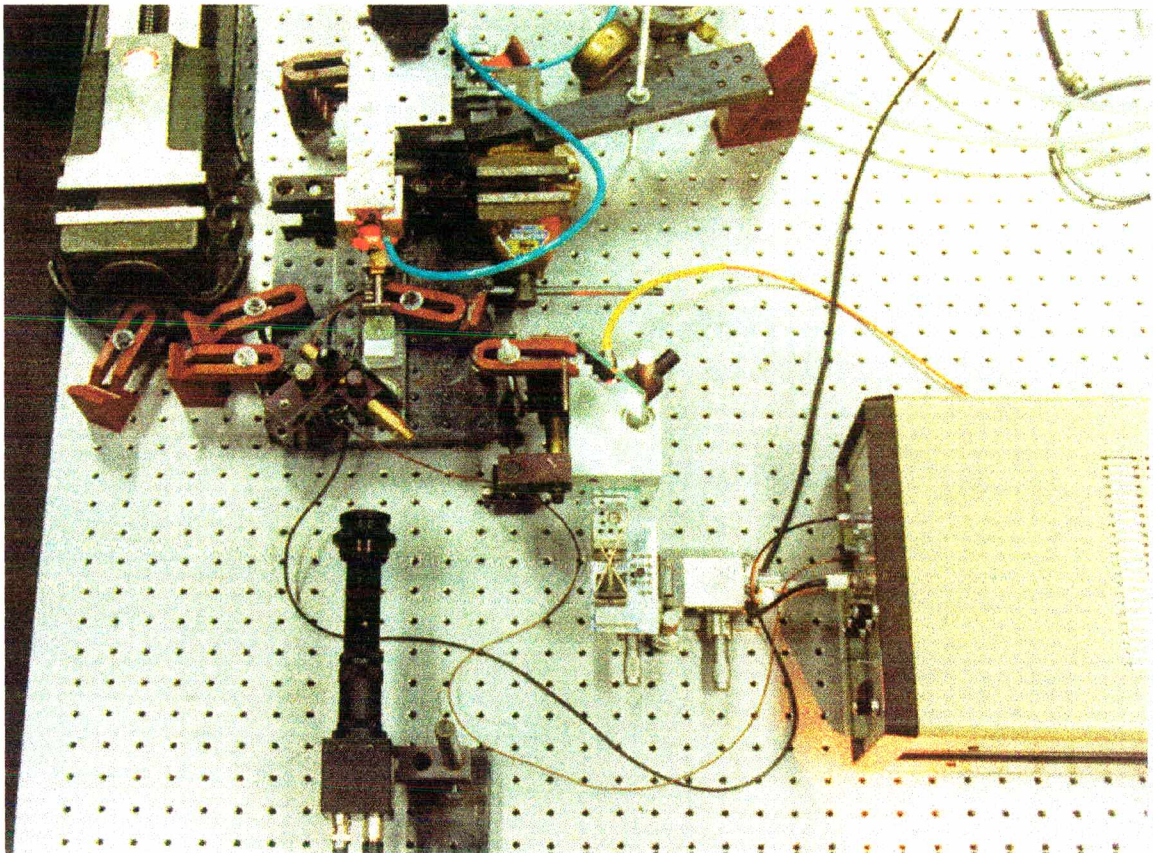


Figura 7.4. Vista superior da bancada óptica.

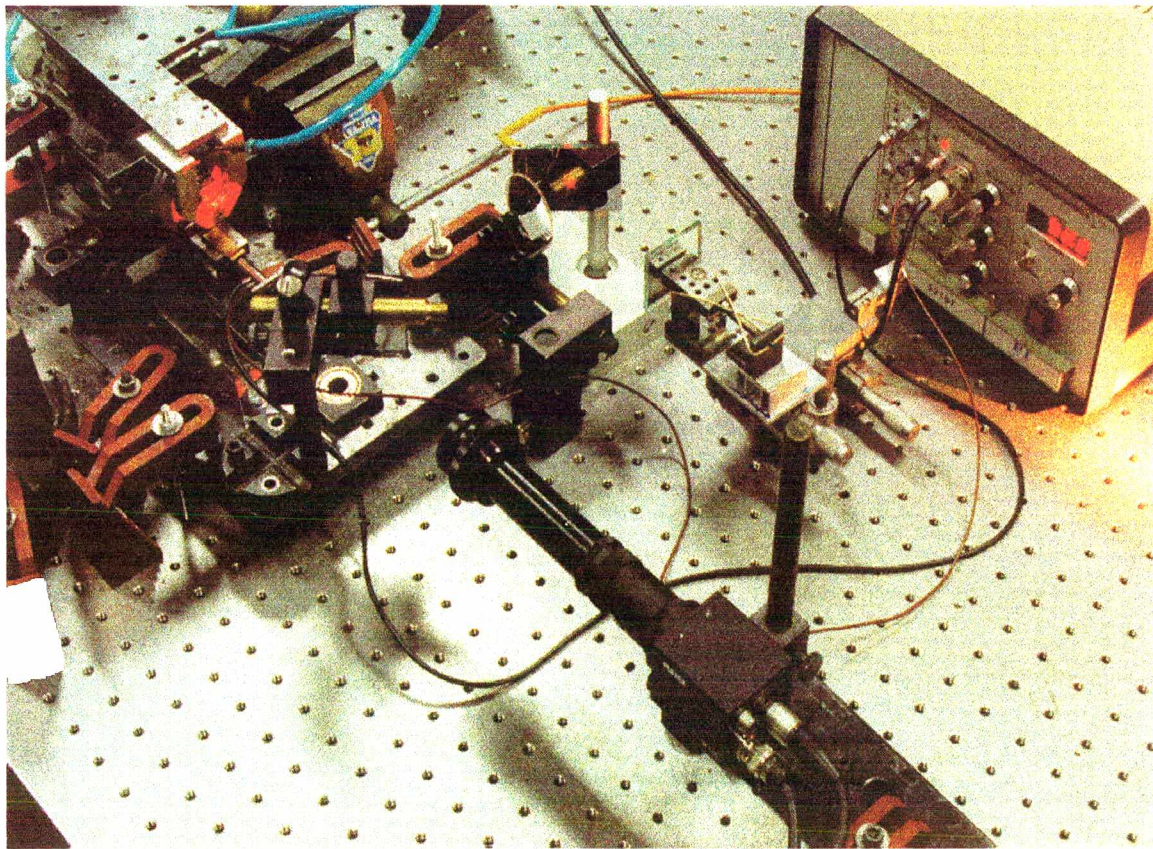


Figura 7.5. Vista lateral da montagem da bancada óptica.



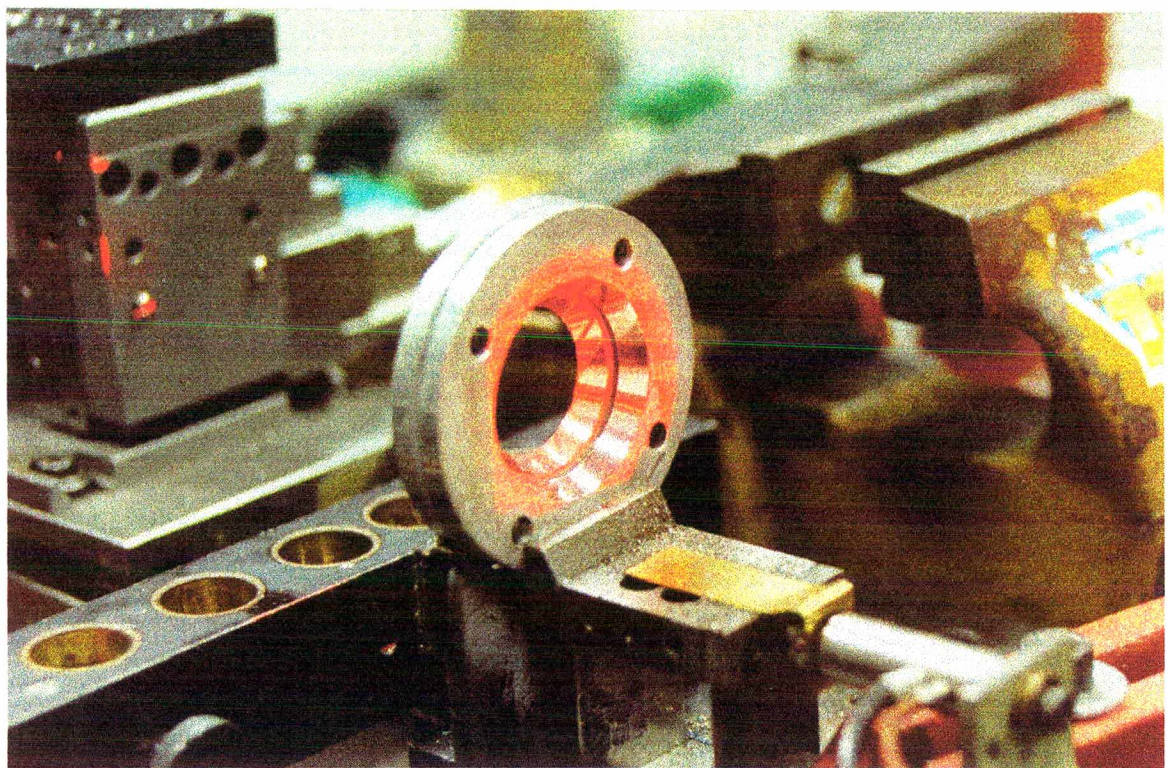


Figura 7.6. Espelhos cônicos utilizados para iluminação radial.

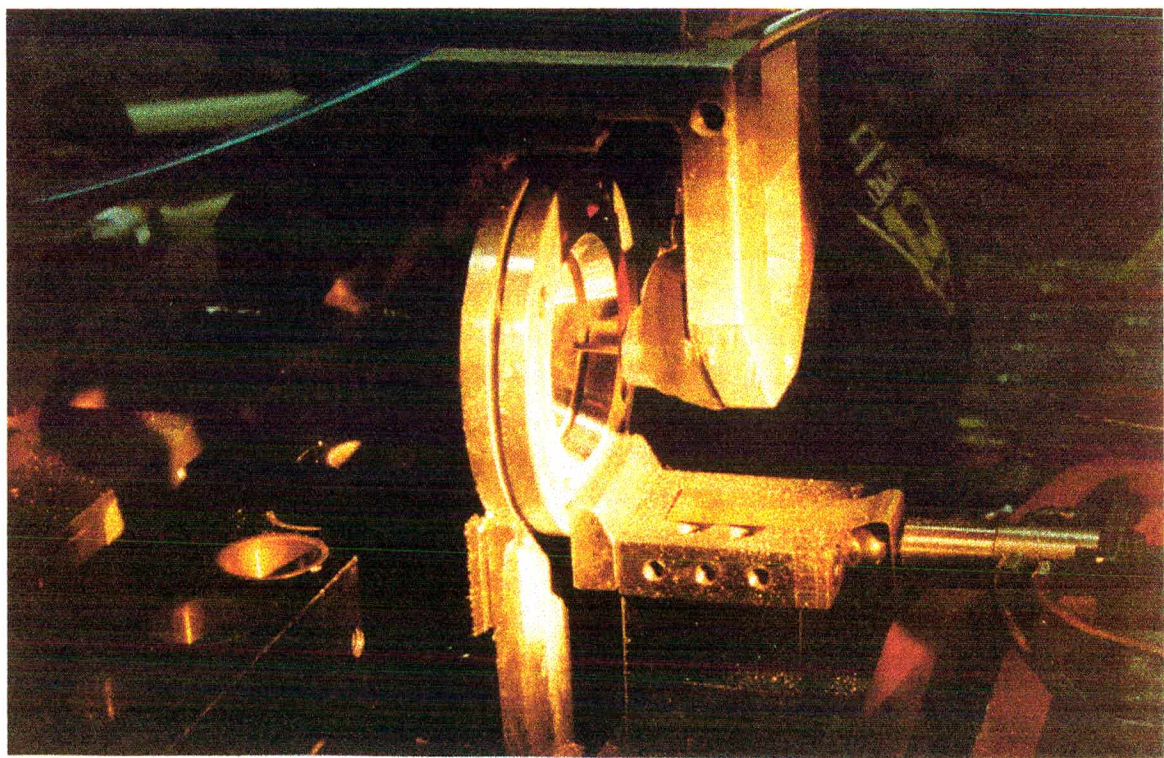


Figura 7.7. Furadeira de altíssima rotação utilizada nos experimentos.



Todas as brocas foram recobertas com nitreto de titânio para diminuir o atrito com a peça. Para realizar o avanço da broca utilizou-se de uma mesa microposicionadora, que também possibilitou realizar a centragem da ferramenta com o centro dos espelhos cônicos.

Tendo sido realizado o carregamento do corpo de prova e as leituras dos extensômetros de resistência o mesmo era posicionado na bancada óptica de forma a garantir a distância entre o espelho cônico e a superfície e evitar deslocamentos de corpo rígido. O posicionamento do corpo de prova também era feito para que os furos se situassem entre si a uma distância mínima de oito vezes o diâmetro do maior furo e para que este fosse feito o mais próximo possível do centro transversal do corpo de prova.

Após o posicionamento do corpo de prova era feita a aproximação da furadeira até que a broca tangenciasse a superfície da peça.. O experimento era conduzido em etapas incrementais de profundidade do furo. Para cada etapa era realizada a captura de uma imagem de mapa de fase antes e depois da furação. O procedimento de análise dos mapas de fase é apresentado no Capítulo 6. Para cada incremento em profundidade eram anotadas as profundidades e eram realizadas as medições do diâmetro do furo após o final do ensaio da face do corpo de prova em análise.

Em cada face dos corpos de prova foi colada uma roseta cujo objetivo era de implementar numa mesma operação a comparação entre dois métodos de medir o alívio de tensão ao redor do furo: holografia X extensometria. No entanto esta meta ficou prejudicada pela dificuldade de se realizar a centragem do furo na roseta e pela presença de níveis maiores de ruído nos ensaios com holografia devido a presença da roseta no campo visual.

Os mapas de fase foram processados considerando três anéis de amostragem contendo 40 pontos igualmente espaçados angularmente em cada anel. Todos os mapas de fase foram analisados considerando a recomendação de diâmetro mínimo de amostragem igual a 2,5 vezes o diâmetro do furo e amostragem máxima de 5 vezes o diâmetro do furo. Em alguns casos, devido a presença de muitas franjas ou de grande ruído, as amostragens foram diferentes destas recomendações, mas ficando dentro do diâmetro máximo de amostragem para evitar erros de interpolação para os coeficientes relativos ao furo cego.



## 7.5 FONTES DE ERROS NAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Nos experimentos realizados, os efeitos de várias fontes de erros estiveram presentes. Alguns efeitos sistemáticos e conhecidos foram evitados ou compensados, outros não. Somam-se a estes, ainda, os diversos erros aleatórios.

A seguir são analisados alguns dos erros evidenciados nesta fase:

### a) Fontes de erros conhecidas e minimizadas *a priori*:

- grandes flexões no plano (minimizado por ajustes com calços durante o carregamento do corpo de prova);
- grandes flexões fora do plano (minimizado por ajustes com calços durante o carregamento do corpo de prova);
- grandes tensões residuais pré existentes no corpo de prova (minimizado pelo tratamento de recozimento do corpo de prova , exceto no caso do alumínio);
- grande introdução de tensões residuais durante o processo de execução do furo (minimizado pelo uso de brocas com gume de corte adequado, uso de recobrimento com nitreto de titânio para diminuir atrito, trocas periódicas das brocas e acompanhamento do processo de furação para detectar problemas na usinagem);
- dilatação térmica localizada devido ao aquecimento pelo processo de furação (minimizado pela espera de alguns segundos após a furação e antes de capturar o sinal de medição);
- grandes deslocamentos de corpo rígido (minimizado pela fixação adequada);
- grande descentragem entre o centro do furo e o eixo óptico do espelho;
- nível elevado de ruído óptico na imagem (minimizado pela redução do tempo de ensaio, pelo ajuste apropriado do diafragma da lente, redução deslocamentos de corpo rígido (responsáveis pela perda de correlação), homogeneidade da superfície medida (ausência de irregularidades), ausência de sombra causada por pontos de solda dos extensômetros);
- desvio do modelamento analítico (minimizado pelo uso de largura e espessura adequada para o corpo de prova e superfície plana - superfícies curvas não são consideradas no modelamento analítico)

b) Fontes de erros conhecidas e compensadas *a priori*,

- gradientes de tensões ao longo da profundidade (provocados por pequena flexão fora do plano do corpo de prova, e compensados através da interpolação bilinear);
- erro na determinação do módulo de elasticidade (foi compensado usando o mesmo valor para cálculo das tensões tanto nos experimentos quanto na determinação do valor de referência);
- pequenos deslocamentos de corpo rígido (compensado pelo algoritmo para compensação de variações do nível de fundo);
- fator de escala da imagem (compensado pela calibração com escala de cristal);

## c) Fontes de erros conhecidas, não corrigidas, mas consideradas na estimativa da incerteza do método:

- tensões residuais pré existentes no corpo de prova a ser ensaiado;
- erro dos coeficientes de elementos finitos (furo cego) causados pela diferença no coeficiente de Poisson e por limitações do modelamento;
- pequena flexão no plano (gradientes de tensões no plano);
- variação do carregamento mecânico durante o ensaio (relaxamento do carregamento e variação devido a fixação na bancada ótica);
- erro do valor de referência;
- erro na determinação do diâmetro do furo;
- erro de ortogonalidade (alinhamento visual);
- erro na determinação da profundidade (uso de parafuso micrométrico e boa fixação da broca no mandril);
- erro devido a dilatação térmica do material durante o ensaio;
- erro devido aquecimento do material durante a usinagem;
- pequeno desalinhamento entre o centro do anel de amostragem e o eixo óptico do espelho;
- pequenos deslocamentos de corpo rígido;
- erro no valor do raio de amostragem;
- erro introduzido pelo processo de filtragem;
- plastificação localizada na borda do furo devido ao carregamento;

## CAPÍTULO 8

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são estimadas as incertezas dos valores de referência (adotados nos experimentos de avaliação da técnica), do sistema de medição de tensões residuais com holografia eletrônica e são apresentados, analisados e discutidos os resultados de uma série de seis ensaios de verificação experimental.

Visando tornar possível a comparação entre vários ensaios com carregamentos distintos, todos os valores de incertezas foram expressos em porcentagem com relação aos valores de referência médios, isto é, são relativos aos valores médios de tensão de cada carregamento.

### 8.1 VALOR DE REFERÊNCIA

Para fins de avaliação dos resultados experimentais obtidos foi adotado como valor de referência para as tensões residuais o valor do carregamento mecânico do corpo de prova, supostamente livre de tensões residuais, medido por meio de extensômetros de resistência.

As principais fontes de incerteza do valor de referência são: as incertezas associadas à extensometria, o carregamento não uniforme dos corpos de prova (diferenças entre os valores encontrados no carregamento e descarregamento, existência de flexão e efeitos de concentração de tensões), as tensões residuais iniciais e as incertezas provocadas pelas variações ambientais.

Embora os valores das constantes elásticas do material constituam uma fonte de incerteza adicional, esta não foi considerada nesta análise pois, para fins de comparação, esta afeta da mesma forma o valor de referência e as medições efetuadas com holografia.



### 8.1.1 EXTENSOMETRIA

As principais fontes de erros associadas à extensometria são:

- a) erros dos extensômetros: fator de sensibilidade, adesivo (vazios e diferença de alongação), sensibilidade transversal, linearidade ( $\pm 0,3\%$ ), diferença entre o fator de compensação de temperatura do ER e o material, gradiente de deformação, auto aquecimento devido a passagem de corrente pelo ER, diferença entre a linha neutra do extensômetro e a linha neutra do corpo de prova;
- b) erros da aquisição dos sinais: conexões, cabos, junção insatisfatória dos pontos soldados - junta fria, geração de força eletromotriz de origem térmica, influência da resistência do fio;
- c) erros da ponte amplificadora: não linearidade do complemento de ponte, estabilidade da tensão de alimentação, não linearidade da ponte amplificadora, ruído elétrico induzido;
- d) erros no processamento dos dados: posição dos extensômetros, desalinhamento dos extensômetros, uso de um único fator de sensibilidade para todos os três extensômetros das rosetas, hipótese de deformação elástica e erros nas constantes do material;
- e) erros devido ao efeito de concentração de tensões na região de colagem dos extensômetros.

Através de modelamento em elementos finitos ficou constada que a concentração de tensões devido a geometria dos corpos de prova não tem influência na região onde os extensômetros foram instalados.

Mesmo com todos os erros citados acima, atinge-se tipicamente incertezas da ordem de até 2% em toda a cadeia de medição, realizando a instalação dos extensômetros e calibrando-os adequadamente. Teoricamente a incerteza de medição para a instrumentação utilizada é da ordem de apenas 1% (ver anexo B) [127]. No entanto por uma questão de segurança estimou-se uma incerteza de 3% para toda a cadeia de medição utilizada. Esta incerteza de 3% é condizente com os cuidados realizados na instalação dos extensômetros (alinhamento no microscópio e outros testes de verificação da instalação dos extensômetros), com os equipamentos utilizados, com os cuidados de manuseio no laboratório e com o intervalo de tempo entre o processo de carregamento, medição e descarregamento.



### 8.1.2 CARREGAMENTO NÃO UNIFORME DOS CORPOS DE PROVA

Com o registro das deformações no carregamento e no descarregamento, pôde-se detectar variações nos valores de referência provocadas por algumas das fontes de erros já citadas anteriormente. Estas variações foram medidas através da instalação de oito extensômetros de resistência em cada corpo de prova (Anexo A). Através dos valores de deformação medidos no carregamento foram calculadas as variações ao longo do plano e ao longo da profundidade (efeitos da flexão no plano e fora do plano respectivamente). As variações ocorridas ao longo do tempo foram calculadas fazendo-se a diferença entre os valores das deformações medidas no carregamento pelas medidas no descarregamento.

As variações devido a flexão fora do plano foram compensadas através de interpolação bilinear considerando os valores de deformação dos quatro extensômetros colados nas faces de interesse (face 1 e face 2). Desta forma pôde-se obter um valor de referência da tensão em cada ponto de interesse sobre o corpo de prova para cada carregamento (pontos onde foram feitos os furos para medição com holografia). A interpolação bilinear reflete bem o comportamento idealizado dos corpos de prova submetidos à flexão. Por outro lado, o interferômetro radial é pouco sensível a gradientes de tensão no plano e os furos foram realizados o mais próximo possível da linha neutra - linha central do corpo de prova. Com estas considerações, o efeito da flexão no plano foi desprezado.

As variações ao longo do tempo foram aleatórias, não puderam ser compensadas e tiveram valores significativos. Estas variações temporais foram significativamente diferentes para os dois carregamentos de cada um dos dois corpos de prova de aço (carregamento para ensaio da face 1 e carregamento para ensaio da face 2) e também de um corpo de prova para outro. Este fato obrigou uma análise independente para as incertezas de cada carregamento e de cada corpo de prova.

Para a estimativa da incerteza devido a variação do carregamento ao longo do tempo foi analisada apenas a diferença de deformação dos extensômetros instalados na face de medição de interesse (face 1 ou face 2) - medição da tração variável ao longo da superfície do corpo de prova. As variações ao longo do tempo das deformações na face oposta e nos extensômetros laterais foram desprezadas por terem pequena influência. Os valores foram estimados a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das variações de carga/descarga dos extensômetros da face em análise.

### 8.1.3 FATORES AMBIENTAIS

A principal fonte de erro provocada por fatores ambientais nas medições realizadas é a variação da temperatura. Como todo o trabalho foi realizado dentro de laboratórios com a temperatura controlada ( $23 \pm 2$ ) °C, este fator foi considerado desprezível para os dois corpos de prova de aço, pois as cunhas de travamento também eram de aço. No caso do corpo de prova de alumínio esta variação de temperatura causaria uma variação de  $\pm 2$  MPa no carregamento, ou seja,  $\pm 1\%$ . Também foram tomadas precauções para equalização da temperatura nos casos em que os corpos de prova foram removidos dos laboratórios para pintura externa.

O aporte de calor local provocado pela furação é muito pequeno e não poderia alterar substancialmente o carregamento mecânico na momento do ensaio. No entanto, a diferença de temperatura entre o ar comprimido utilizado pela turbina pneumática de furação e a peça pôde causar erros devido a gradientes de temperatura momentâneos e, principalmente com o alumínio, dilatação diferencial entre corpo de prova e o dispositivo de travamento. Para o alumínio a influência deste efeito sobre a medição de tensões residuais foi estimado em  $\pm 2$  MPa, ou seja, da ordem de  $\pm 1\%$ .

### 8.1.4 TENSÕES RESIDUAIS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA

A avaliação dos níveis de tensões residuais iniciais para cada corpo de prova foi realizada utilizando o próprio método do furo cego associado com a holografia eletrônica e também com rosetas extensométricas.

Devido a presença de tensões residuais iniciais diferentes para cada corpo de prova, foi necessária uma análise independente dos erros considerando cada material separadamente. Para os corpos de prova de aço as tensões residuais iniciais foram menores do que 5 MPa, já para o alumínio os valores foram de até 70 MPa. Como os valores de tensões residuais iniciais podem variar de ponto para ponto este erro não pôde ser compensado.



8.1.5 INCERTEZA COMBINADA DO VALOR DE REFERÊNCIA

Numa primeira análise da incerteza combinada dos valores de referência, julgou-se conveniente separar as incertezas causadas pela presença de tensões residuais iniciais das demais. Com isto, esta análise de incertezas poderá vir a ser futuramente mais facilmente repetida caso novos corpos de prova, com níveis inferiores de tensões residuais iniciais, venham a ser obtidos.

i. Incerteza combinada do valor de referência desconsiderando tensões residuais iniciais

Neste caso foram considerados: a) incerteza da medição por extensometria b) variações dos carregamentos ao longo do tempo e c) influências dos fatores ambientais (temperatura), ver Figura 8.1.

Corpo De Prova	Variação Temporal		Incerteza da Extensometria	Diferença de Temperatura	Incertezas Combinadas	
	Face 1	Face 2			Face 1	Face 2
Aço 1045	1,50%	10%	3%	0%	3,5%	10,5%
Aço 4140	4%	9%	3%	0%	5%	9,5%
Alumínio 201	1,50%	2%	3%	2%	4%	4%

Figura 8.1 Incertezas combinadas para os valores de referência, desconsiderando a presença das tensões residuais iniciais. Valores relativos a tensão medida.

Nota-se que os primeiros carregamentos, face 1, apresentaram melhor comportamento. Após o primeiro ciclo de solicitação, carregamento e descarregamento, o corpo de prova acaba apresentando deformações plásticas localizadas devido ao método de imposição da cunha de travamento (flexão localizada da cabeça do corpo de prova) e também ocorrem variações dimensionais devido aos danos provocados nas superfícies em contato com a cunha de travamento durante o carregamento e descarregamento da face 1. Devido à estes fatores, aliados à dificuldade de realização do primeiro carregamento nos dois corpos de prova de aço, os segundos carregamentos foram mais problemáticos. Já no caso do corpo de prova de alumínio a montagem da cunha de travamento, tanto no primeiro como no segundo carregamento, foi mais fácil e induziu a menores erros.

ii. Incerteza combinada do valor de referência considerando tensões residuais iniciais:

Para estimar as incertezas totais envolvidas no valor de referência foram consideradas todas as fontes de incertezas citadas nos tópicos anteriores e a presença de tensões residuais iniciais. As incertezas são estimadas para cada material e carregamento (carregamento para análise da face 1 e carregamento para análise da face 2). As incertezas foram combinadas através da raiz quadrada da soma dos quadrados de cada parcela, conforme Figura 8.2.

Na análise de erros de medição aconselha-se que sejam adotados padrões com incertezas dez vezes menores do que o erro esperado para o processo de medição a calibrar. Em casos onde isto é muito difícil, esta condição pode ser relaxada para valores de incertezas do padrão três a cinco vezes menores do que a do sistema a calibrar. Em alguns dos experimentos realizados esta condição não pôde ser rigorosamente obedecida. Nestes casos, um procedimento estatístico alternativo foi utilizado, como será detalhado no item 8.4.

Corpo de Prova	Demais Parcelas		Tensões Residuais Iniciais	Incertezas Combinadas	
	Face 1	Face 2		Face 1	Face 2
Aço 1045	3,5%	10,5%	3%	5%	11%
Aço 4140	5%	9,5%	2%	5%	10%
Alumínio 201	4%	4%	40%	40%	40%

Figura 8.2 Incertezas combinadas para o valor de referência considerando a presença das tensões residuais iniciais. Valores relativos a tensão medida.

Considerando os resultados de incerteza de medição do valor de referência vê-se que no melhor caso tem-se incertezas de 5% que é a metade da incerteza esperada para a técnica. Com aperfeiçoamento do sistema de carregamento (melhor controle geométrico dos corpos de prova e da cunha de travamento), com a calibração dos extensômetros instalados e com um tratamento de alívio de tensões residuais iniciais mais eficiente, acredita-se que a incerteza do valor de referência pode ser reduzida para 3%.



## 8.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM HOLOGRAFIA ELETRÔNICA E MÉTODO DO FURO

No Capítulo 4 foram apresentados algumas fontes de incertezas envolvidas no processo de medição de tensões residuais usando o método do furo. Aqui estas serão quantitativamente discutidas de forma a avaliar teoricamente a incerteza total do método de medição de tensões residuais com holografia eletrônica.

A análise da propagação e combinação de erros no método da holografia eletrônica foi realizada utilizando simulações numéricas. A justificativa para este tipo de análise é devido ao fato de que o método utiliza algoritmo baseado em dados redundantes, método dos mínimos quadrados, para a determinação das tensões. Neste caso, a análise de erros convencional, baseada em expressões matemáticas, não é trivial.

Comparando resultados obtidos para um mesmo mapa de fases, simulado ou real - variando-se isoladamente - ou não, alguns parâmetros dos ensaios, foi obtido informações com respeito às incertezas geradas por cada grandeza associada aos ensaios.

Os parâmetros envolvidos nos ensaios foram divididos em:

- i. Parâmetros associados ao método do furo: a) diâmetro do furo, b) profundidade do furo, c) ortogonalidade do eixo do furo, d) módulo de elasticidade, e) coeficiente de Poisson, f) tensões residuais induzidas pela furação, g) plastificação da borda do furo, h) validade do modelamento analítico e i) coeficientes do furo cego;
- ii. Parâmetros da holografia eletrônica: a) descentragem do eixo óptico do interferômetro, b) a frequência de corte dos filtros passa-baixas (filtragem), c) nível de ruído do mapa de fase, d) erro de quantização da câmera, e) fator de escala/raio de amostragem da imagem e f) variação do nível de fundo;
- iii. Perturbações ambientais: a) dilatação térmica e b) deslocamento de corpo rígido.

Para estimar a incerteza associada a cada parâmetro da holografia eletrônica utilizou-se de valores típicos para as variações de cada grandeza, obtidos da experiência prática e da literatura. A incerteza total foi estimada por métodos estatísticos a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas ocasionadas por cada parâmetro avaliado.

A seguir são apresentadas as incertezas típicas do método de holografia eletrônica para medição de tensões residuais (Figura 8.3). As incertezas atribuídas para o método utilizando furos de menores diâmetros - entre 0,8 e 1,0 mm - são um pouco maiores do que quando o método utiliza diâmetros maiores - entre 1,6 e 2 mm. Diâmetros maiores geram uma relação sinal/ruído de medição maior. Com a combinação das incertezas apresentadas na Figura 8.3 estimou-se que a incerteza expandida típica para o sistema de medição de tensões residuais com holografia eletrônica é de:

- 13,5% do valor medido utilizando-se furos de diâmetro de 0,6 a 1 mm e
- 12% do valor medido utilizando-se furos de diâmetro de 1,6 a 2 mm.

A comprovação de que efetivamente a técnica de medição de tensões residuais com holografia eletrônica apresenta incerteza total menor do que 13,5% do valor medido a colocaria junto de outras técnicas já consagradas. A busca por esta comprovação é vista a seguir, item 8.3 Resultados Experimentais.

ITEM	FONTES DE INCERTEZAS	FUROS DE 0,8 A 1 mm		FUROS DE 1,6 A 2 mm	
		INCERTEZA TÍPICA(*)	INCERTEZAS NAS TENSÕES	INCERTEZA TÍPICA(*)	INCERTEZAS NAS TENSÕES
1	INCERTEZAS DO MÉTODO DO FURO				
1.1	Diâmetro e cilindricidade do furo [mm]	0,025	4,5%	0,025	2%
1.2	Profundidade do furo [mm]	0,025	2,5%	0,025	1%
1.3	Ortogonalidade do furo [° ]	2°.	1%	2°.	1%
1.4	Módulo de elasticidade [MPa]	0%	0%(**)	0%	0%(**)
1.5	Coefficiente de Poisson	5%	0,7%	5%	0,7%
1.6	Tensões residuais induzidas pela furação	15 MPa(***)	5%	15 MPa	5%
1.7	Plastificação da borda do furo	-	3%	-	3%
1.8	Validade do modelamento analítico	-	0%	-	0%
1.9	Coefficientes do furo cego (FEM)	-	5%	-	5%
1.10	Gradientes de tensões na profundidade	-	4%	-	4%
1.11	Gradientes de tensões no plano	-	0,5%	-	0,5%
	Incerteza Combinada Parcial		10%		9%
2	INCERTEZAS DA HE.				
2.1	Descentragem do eixo óptico/furo [mm]	0,5	3%	0,5	3%
2.2	Descentr. Amostragem/eixo óptico[pixel]	0,2	4%	0,2	4%
2.2	Filtros passa-baixas na imagem	-	4%	-	4%
2.3	Ruído dos mapas de fase [nível cinza]	15	5%	15	3%
2.4	Erro de quantização da câmera	-	0,2%	-	0,2%
2.5	Fator de escala/raio de amostragem	-	1%	-	0,5%
2.6	Variação do nível de fundo [OF]	0,1	3%	0,1	2%
	Incerteza Combinada Parcial		9%		7,5%
3	PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS			-	-
3.1	Dilatação (aquecimento localizado)	-	1%	-	0,5%
3.2	Deslocamento de corpo rígido [µm]	0,1	0,5%	0,1	0,5%
	Incerteza Combinada Parcial		1%		1%
4	INCERTEZA COMBINADA TOTAL		13,5%		12%

Figura 8.3 Incertezas de medição de tensões residuais com holografia eletrônica associada ao método do furo utilizando diâmetros da broca de 0,8 até 1 mm ou 1,6 a 2 mm. [82, 88, 119, 120]. Incertezas nas tensões relativas a tensão medida.

(\*) operador experiente;

(\*\*) não considerado pois afeta da mesma forma o valor de referência e o valor medido por holografia;

(\*\*\*) processo de furação apropriado e materiais de boa usinabilidade.



### 8.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais são apresentados separadamente para cada carregamento/face na forma de tabelas e de gráficos. Para cada carregamento/face são apresentados os dados do ensaio e os valores dos resultados das medições para as tensões e as direções principais normalizadas. No Anexo A estão apresentados em detalhes os demais dados de cada ensaio.

Os dados do ensaio são: a) os valores de referência, b) o valor médio da referência, c) a incerteza da referência, d) o número de pontos de medição válidos e os diâmetros dos furos, e) a tensão de escoamento do material e f) a relação entre a tensão de carregamento e a tensão de escoamento.

Em função da não uniformidade do campo de tensões simulado no corpo de prova, os valores medidos foram reduzidos a uma mesma base de comparação: as tensões residuais medidas pela holografia foram divididas pelo valor de referência da tensão atuante no ponto considerado, obtida por interpolação bilinear. Tanto o valor de  $\sigma_1$  quanto o valor de  $\sigma_2$  foram divididos pelo valor de referência e são apresentados nos gráficos de resultados como valores normalizados.

Os resultados das medições para as tensões e direções principais normalizadas são apresentados com: a) uma tabela com os valores dos erros dos experimentos de medição separados em tendência e repetitividade com relação ao valor de referência, b) os gráficos dos resultados normalizados versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição e c) os gráficos das curvas de erros versus profundidade nominal.



8.3.1 CORPO DE PROVA DE AÇO 1045 - CARREGAMENTO 1 - FACE 1

i. DADOS

Material:	AÇO 1045	FACE 1
Valores de Referência (VR)	ER2= 188 MPa	Incerteza dos VR = +/-5%
	ER6= 139 MPa	Valor Médio dos VR = 160 MPa
Pontos de Medição Válidos:	3 furos de $\phi$ 0,9 mm	Tensão de Escoamento = 300
	4 furos de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Carregamento = 50% $\sigma_e$

ii. RESULTADOS

a) TABELA DE ERROS

Profundidade	0,5 mm		1,0 mm		1,5 mm		2,0 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	-4%	31%	2%	21%	1%	25%	1%	21%
$\sigma_{2R}$	-18%	15%	-6%	21%	-7%	23%	-7%	21%
$\beta_R$	-2,2°	1,7°	-1,9°	2,5°	-1,5°	2°	-1,4°	3,1°

Figura 8.4 Erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento 1/face 1. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência  
Re = Repetitividade

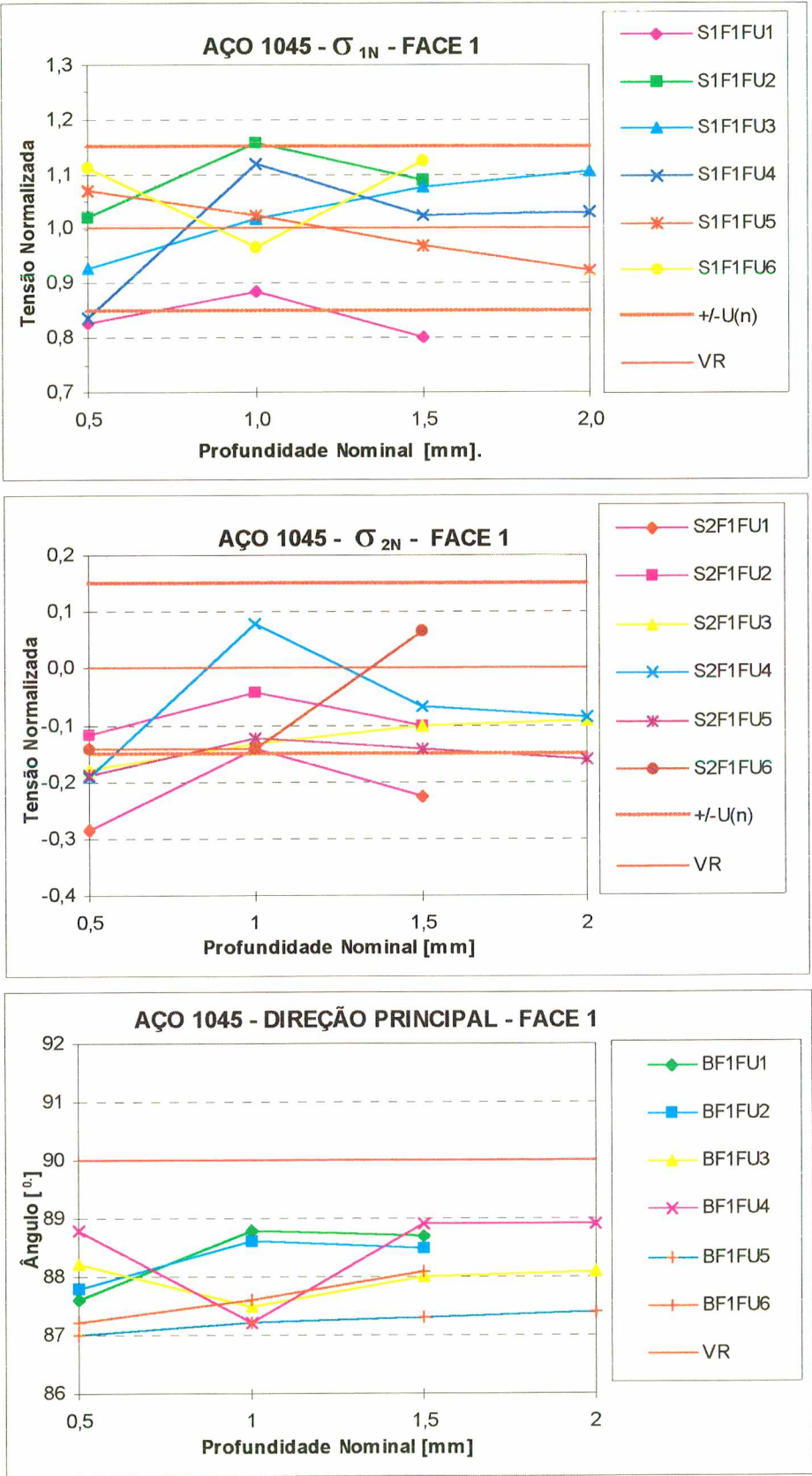


Figura 8.5 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento 1/face 1.

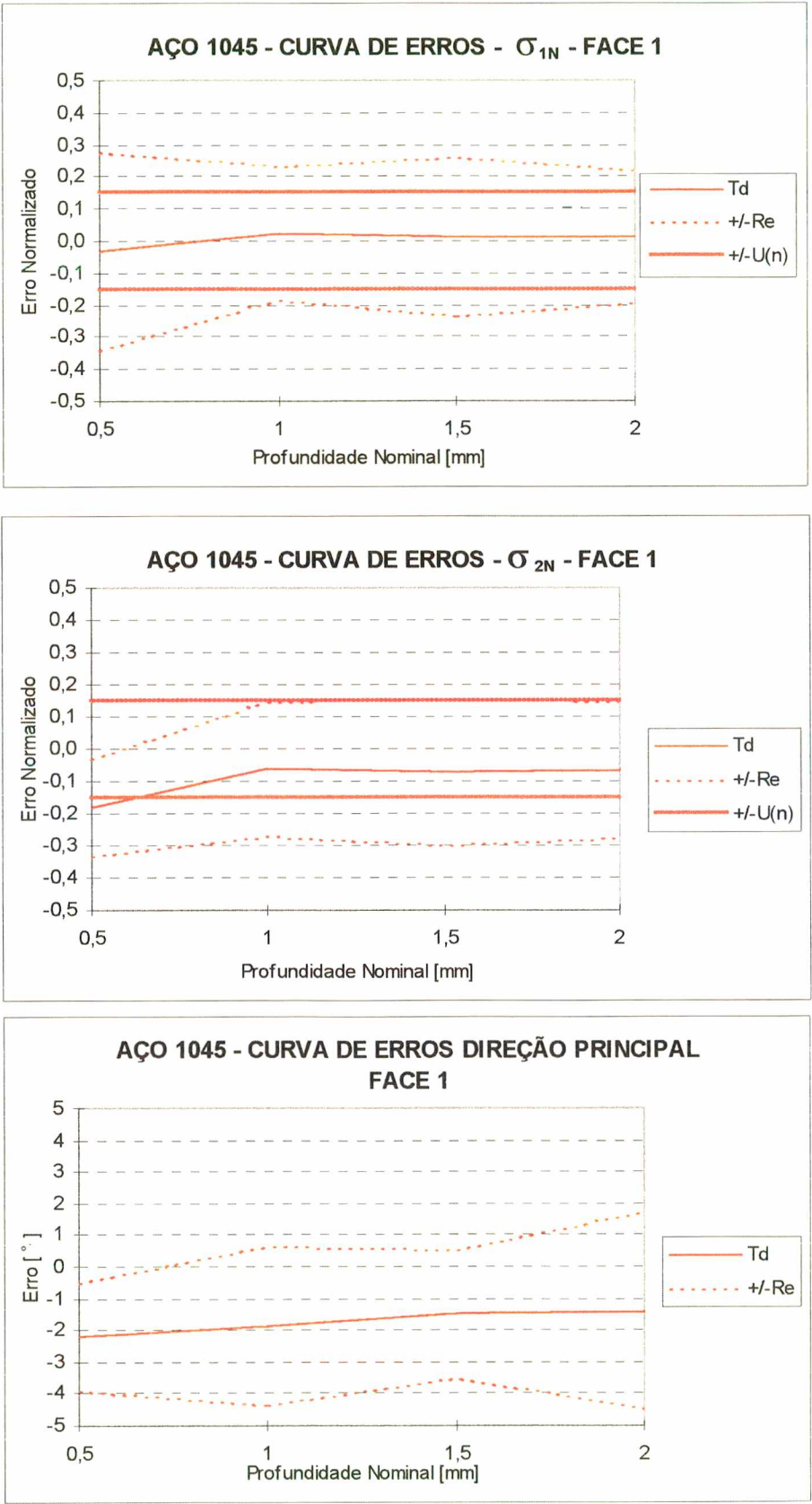


Figura 8.6 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento 1/face 1.

8.3.2 CORPO DE PROVA DE AÇO 1045 - CARREGAMENTO 2 - FACE 2

Material:	AÇO 1045	FACE 2
Valores de Referência (VR)	ER1= 208 MPa ER5= 230 MPa	Incerteza dos (VR) = +/-11% Valor Médio = 220 MPa
Pontos de Medição Válidos:	2 furos de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Escoamento = 300 Tensão de Carregamento = 75% $\sigma_e$

Profundidade	1,0 mm		1,5 mm		2,0 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	2%	12%	7%	1%	12%	14%
$\sigma_{2R}$	-3%	74%	-3%	69%	-3%	64%
$\beta_R$	-1,8°	54°	-1,3°	45°	-1,1°	41°

Figura 8.7 Tabela de erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento2/face2. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência  
Re = Repetitividade



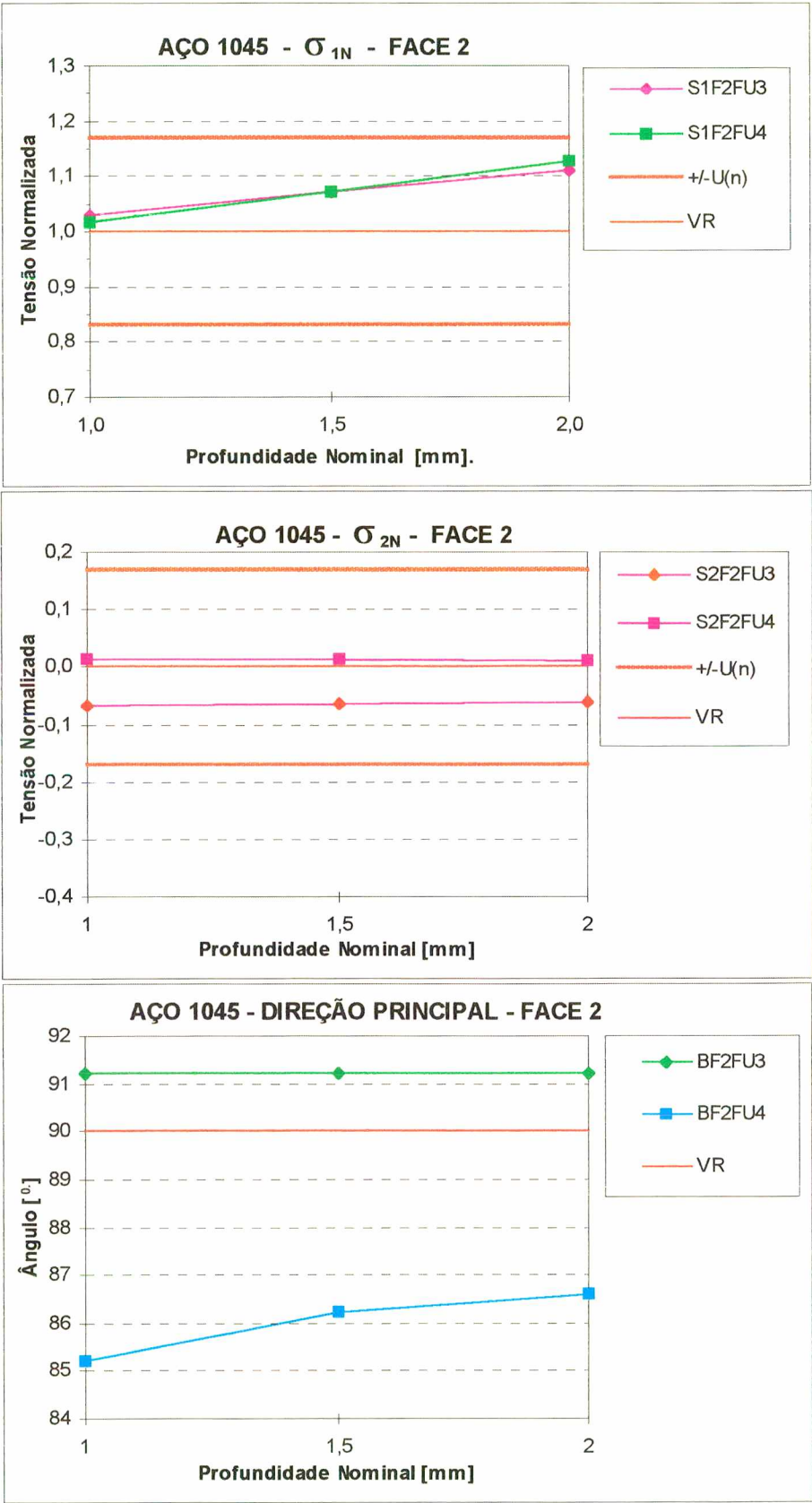


Figura 8.8 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento 2/face 2.

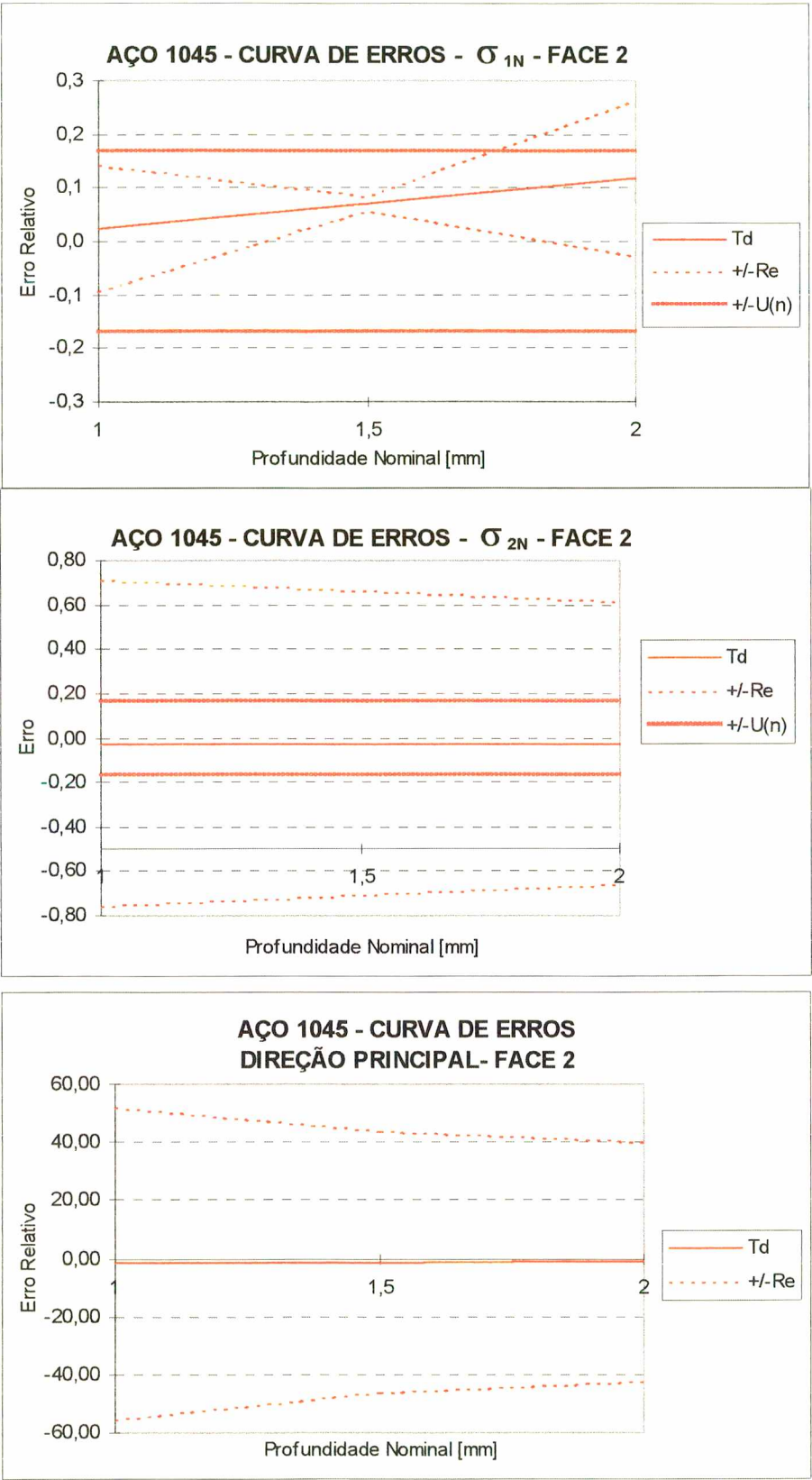


Figura 8.9 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 1045 - carregamento 2/face 2.

8.3.3 CORPO DE PROVA DE AÇO 4140 - CARREGAMENTO 1 - FACE 1

Material:	AÇO 4140	FACE 1
Valores de Referência (VR)	ER2= 237 MPa ER6= 192 MPa	Incerteza dos (VR) = +/-5% Valor Médio = 230 MPa
Pontos de Medição Válidos:	3 furos de $\phi$ 0,9 mm 4 furos de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Escoamento = 600 Tensão de Carregamento = 38% $\sigma_e$

Profundidade	0,5 mm		1,0 mm		1,5 mm		2,0 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	-1%	7%	-2%	14%	-2%	22%	6%	7%
$\sigma_{2R}$	7%	18%	10%	11%	11%	13%	8%	11%
$\beta_R$	0,7°	5,8°	0,6°	1,4°	0,2°	1,6°	0,2°	1,3°

Figura 8.10 Tabela de erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento 1/face 1. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência  
Re = Repetitividade

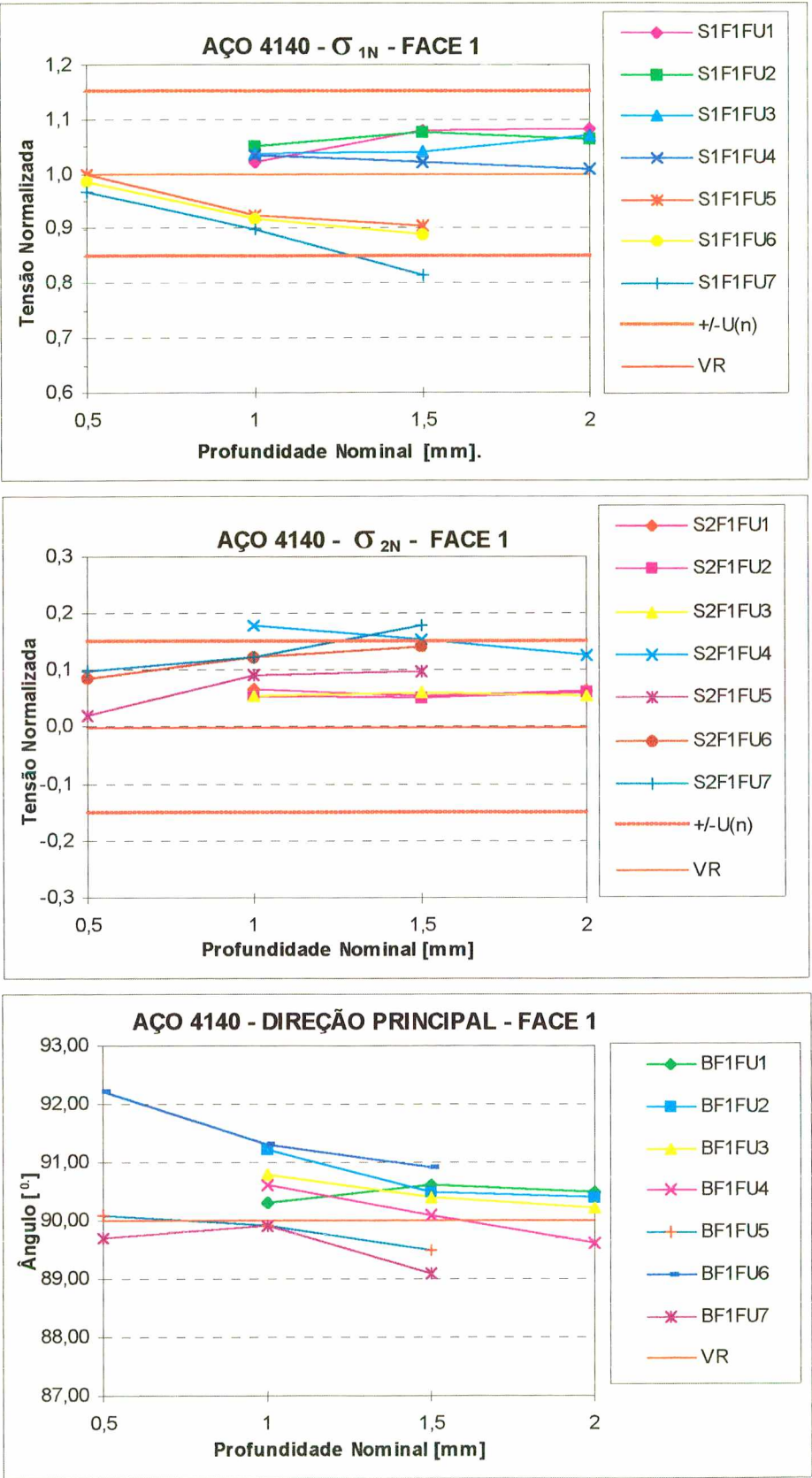


Figura 8.11 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento 1/face 1.



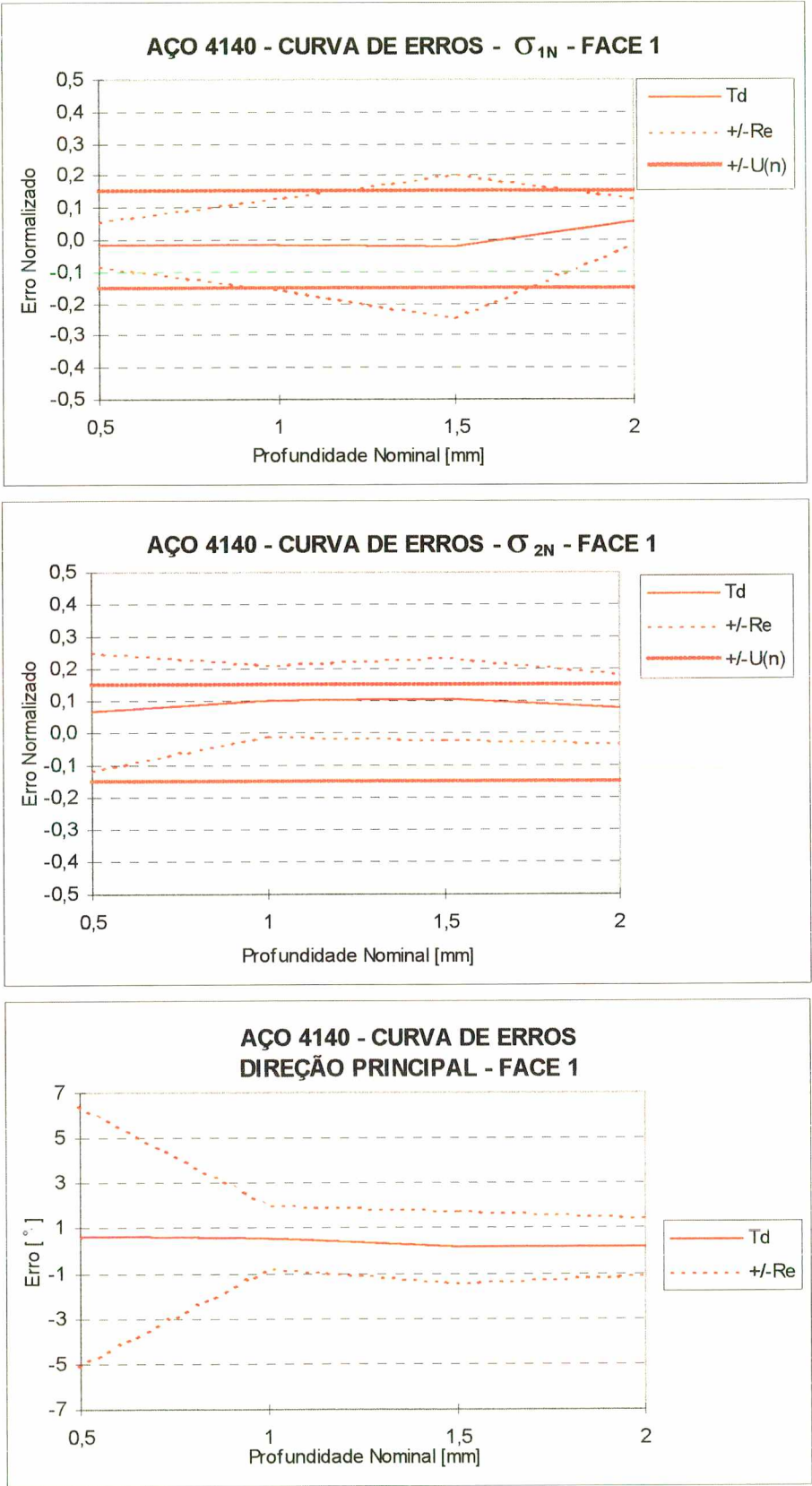


Figura 8.12 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento 1/face 1.

8.3.4 CORPO DE PROVA DE AÇO 4140 - CARREGAMENTO 2 - FACE 2

Material:	AÇO 4140	FACE 2
Valores de Referência (VR)	ER1= 215 MPa ER5= 194 MPa	Incerteza dos (VR) = +/-10% Valor Médio = 215 MPa
Pontos de Medição Válidos:	8 furos de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Escoamento = 600 Tensão de Carregamento = 36% $\sigma_e$

Profundidade	1,0 mm		1,5 mm		2,0 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	6%	18%	4%	14%	3%	11%
$\sigma_{2R}$	10%	7%	11%	7%	12%	7%
$\beta_R$	6,2°	2,3°	6°	2,1°	5,9°	2°

Figura 8.13 Tabela de erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento2/face2. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência  
Re = Repetitividade

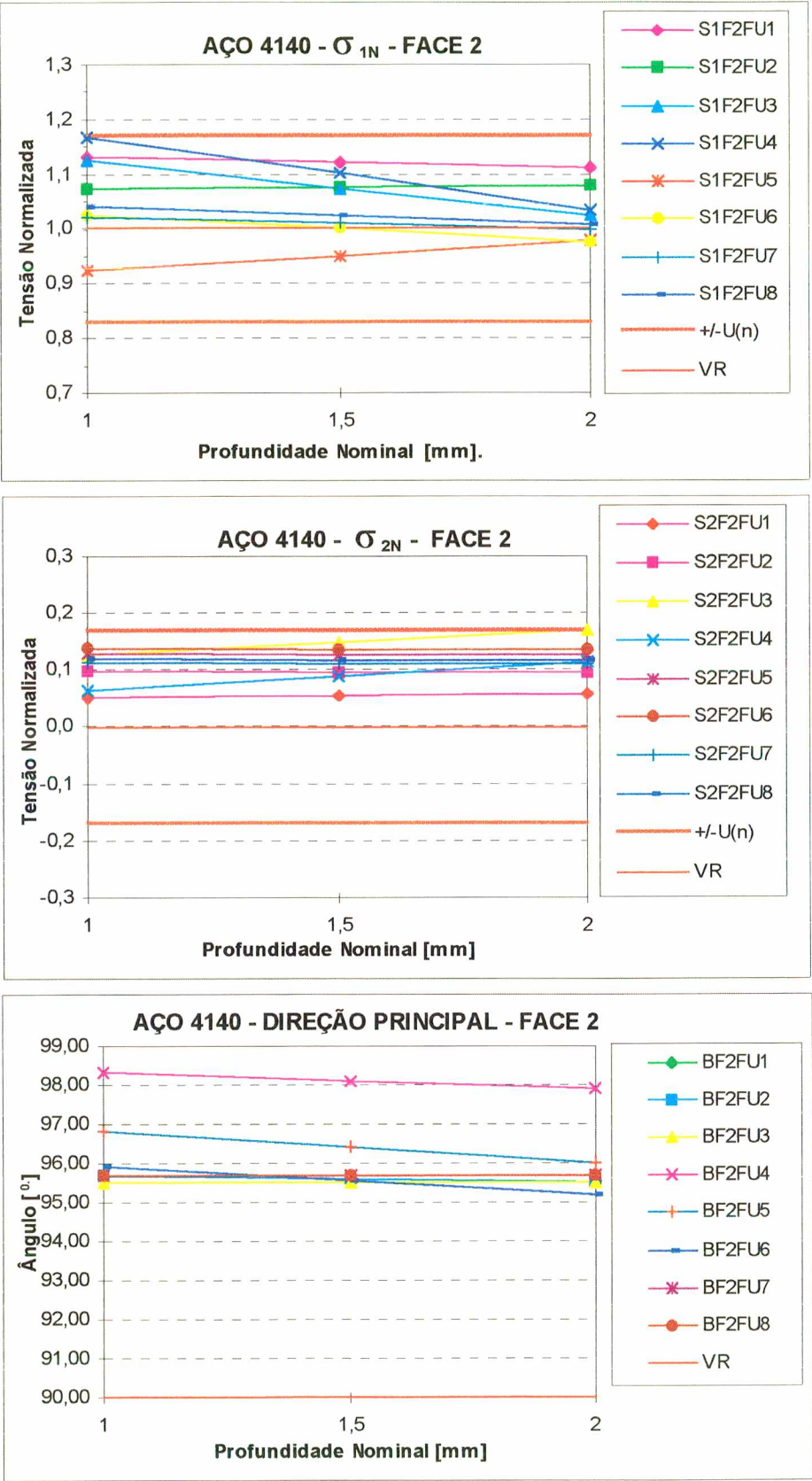


Figura 8.14 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento 2/face 2.

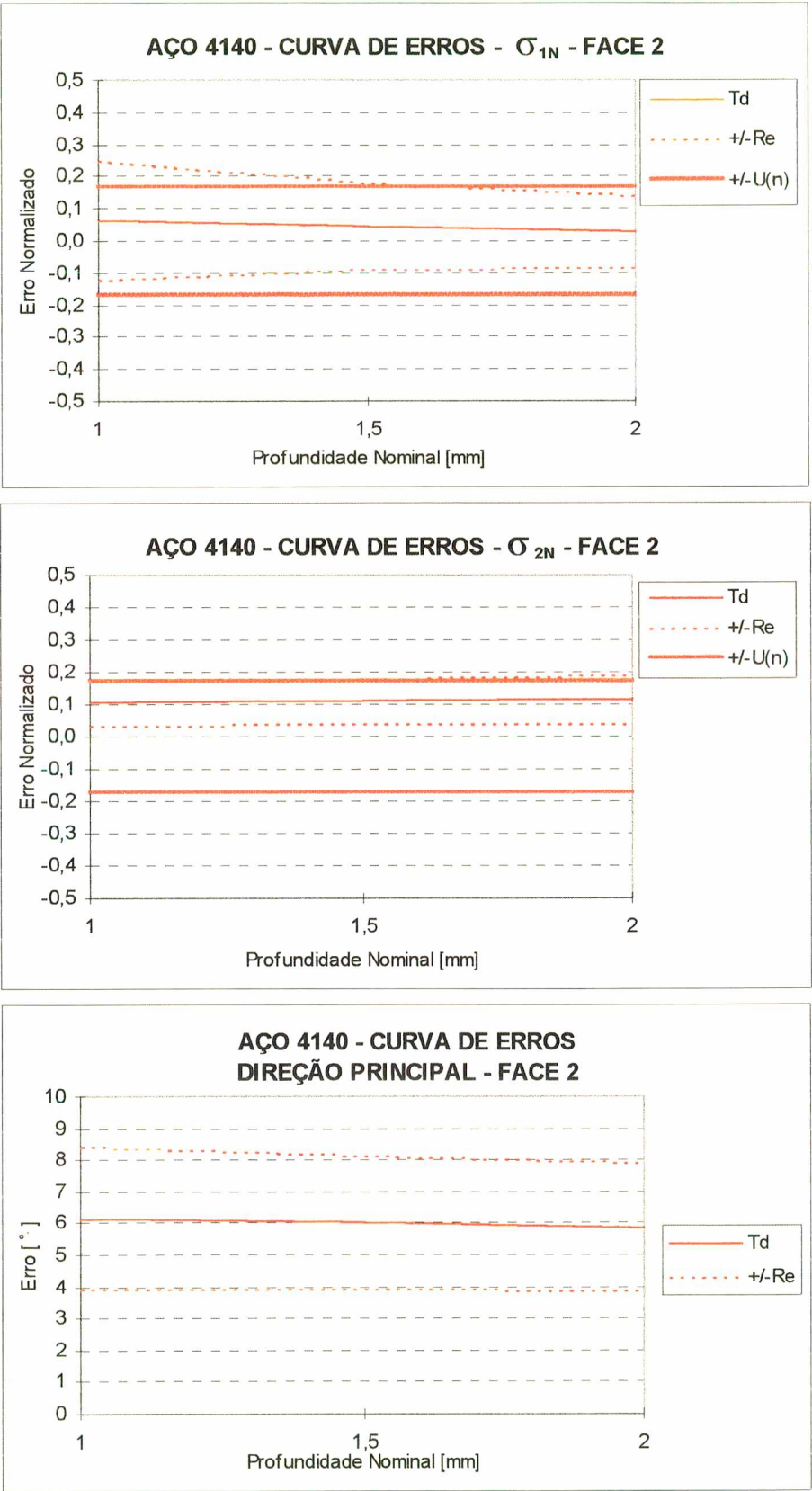


Figura 8.15 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de aço 4140 - carregamento 2/face 2.



8.3.5 CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO 201 - CARREGAMENTO 1 - FACE 1

Material:	ALUMÍNIO 201	FACE 1
Valores de Referência (VR)	ER1= 204 MPa ER5= 213 MPa	Incerteza dos (VR) = +/-40% Valor Médio = 210 MPa
Pontos de Medição Válidos:	6 furos de $\phi$ 0,9 mm 1 furo de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Escoamento = 375 Tensão de Carregamento = 57% $\sigma_e$

Profundidade	0,5 mm		1,0 mm		1,5 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	34%	33%	21%	14%	22%	32%
$\sigma_{2R}$	-7%	25%	-23%	75%	-14%	69%
$\beta_R$	-2°.	1°.	-1,8°.	1,8°.	-1,7°.	2°.

Figura 8.16 Tabela de erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento1/face1. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência

Re = Repetitividade

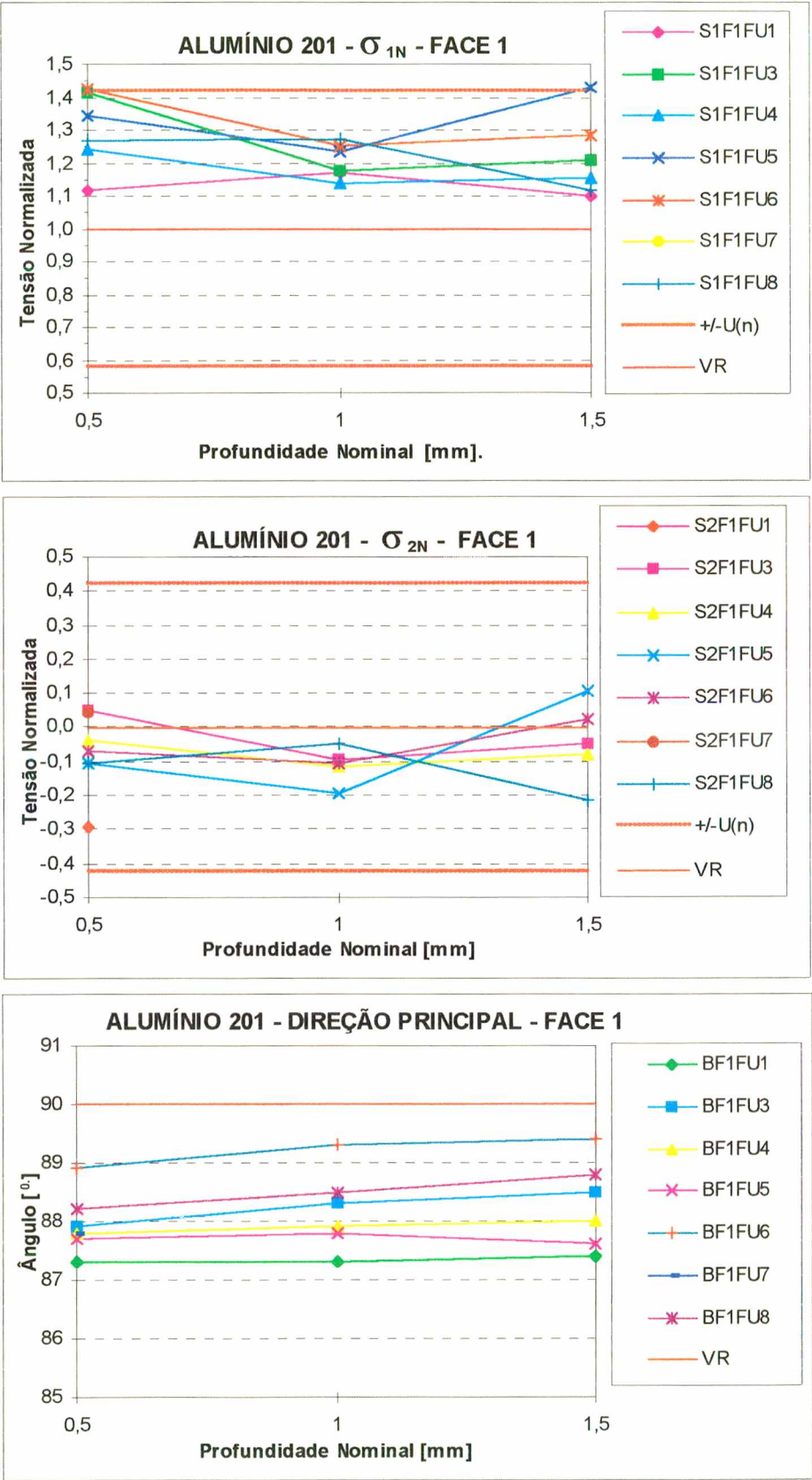


Figura 8.17 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento 1/face 1.

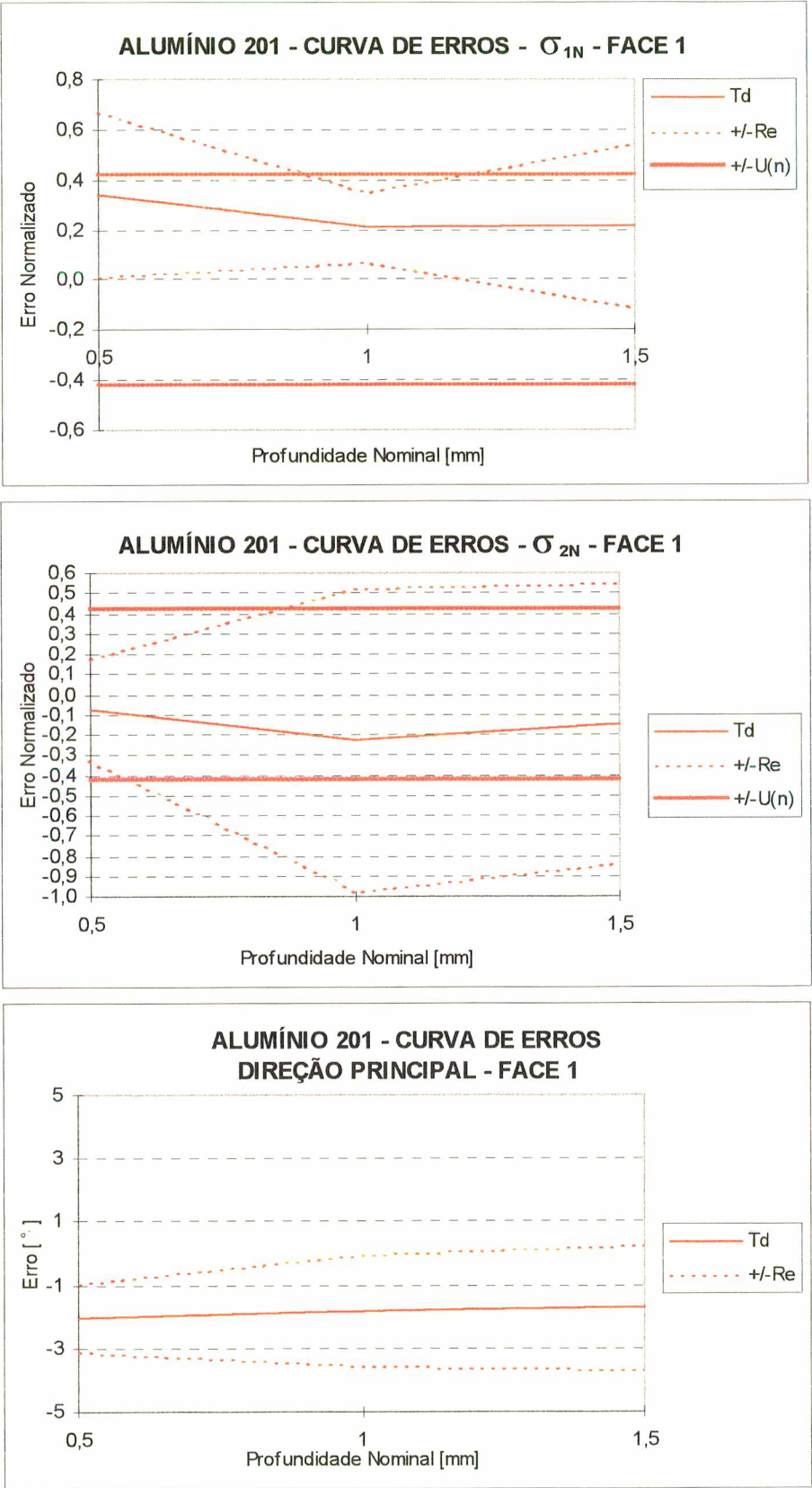


Figura 8.18 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento 1/face 1.

8.3.6 CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO 201 - CARREGAMENTO 2 - FACE 2

Material:	ALUMÍNIO 201	FACE 2
Valores de Referência	ER2= 210 MPa	Incerteza dos (VR) = +/-40%
(VR)	ER6= 228 MPa	VR Médio = 220 MPa
Pontos de Medição Válidos:	6 furos de $\phi$ 0,9 mm	Tensão de Escoamento = 375
	2 furos de $\phi$ 1,9 mm	Tensão de Carregamento = 60% $\sigma_e$

Profundidade	0,5 mm		1,0 mm		1,5 mm	
Parâmetro	Td	Re	Td	Re	Td	Re
$\sigma_{1R}$	28%	34%	16%	18%	8%	25%
$\sigma_{2R}$	-1%	9%	-5%	11%	-9%	25%
$\beta_R$	-2,7°	2°	-2,6°	1,4°	-2,7°	1,3°

Figura 8.19 Tabela de erros dos experimentos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento2/face2. Valores relativos ao Valor Médio do VR.

Onde Td = Tendência

Re = Repetitividade



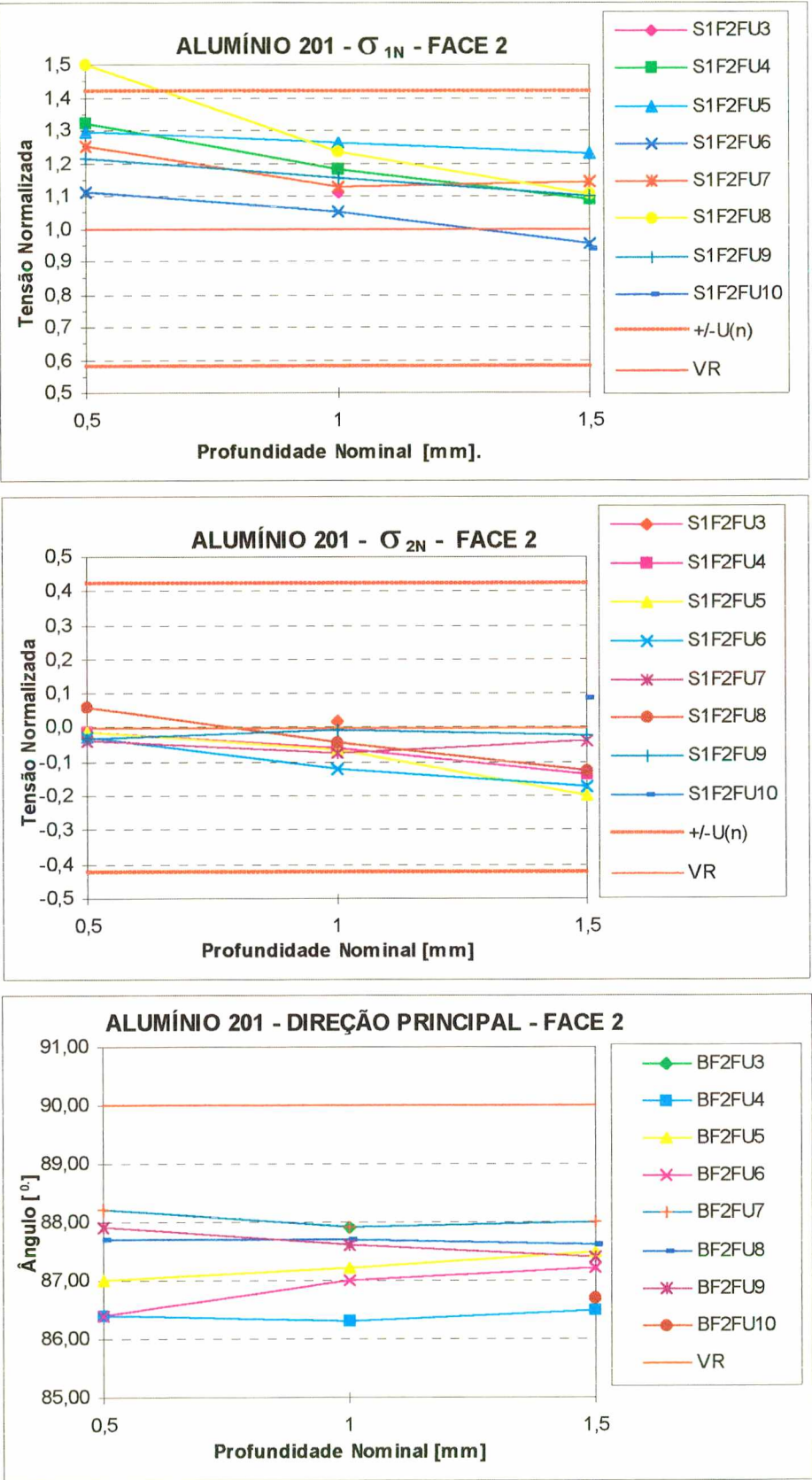


Figura 8.20 Gráficos das tensões principais normalizadas e das direções principais versus profundidade nominal contendo todos os pontos de medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento 2/face 2.

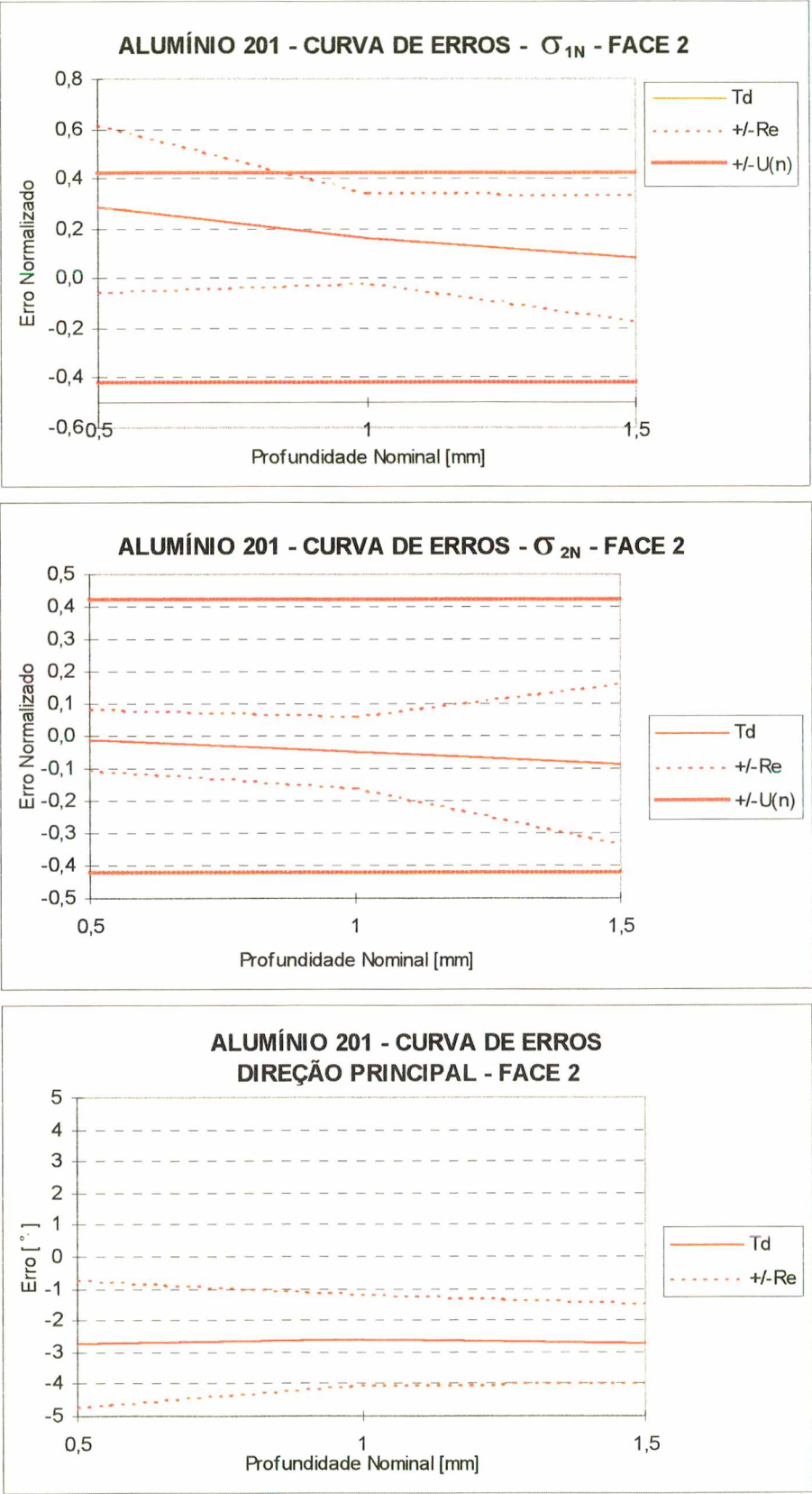


Figura 8.21 Gráficos das curvas de erros da medição de tensões residuais com holografia eletrônica para o corpo de prova de alumínio 201 - carregamento 2/face 2.

8.4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os valores das tensões normalizadas ( $\sigma_N$ ) foram obtidos a partir da razão entre as tensões medidas pela holografia ( $\sigma_{HE}$ ) e o valor de referência ( $\sigma_{VR}$ ). As incertezas expandidas para os valores das tensões normalizadas foram estimadas através da equação abaixo:

$$\frac{U(\sigma_N)}{\sigma_N} = \sqrt{\left(\frac{U(\sigma_{HE})}{\sigma_{HE}}\right)^2 + \left(\frac{U(\sigma_{VR})}{\sigma_{VR}}\right)^2}$$

- onde:  $\sigma_N = \frac{\sigma_{HE}}{\sigma_{VR}}$       tensões residuais normalizadas;
- $\sigma_{HE} =$                       tensões residuais medidas com holografia eletrônica;
- $\sigma_{VR} =$                       valores das tensões de referência;
- $U(\sigma_{HE}) =$                 incerteza expandida das tensões residuais da holografia eletrônica;
- $U(\sigma_{VR}) =$                 incerteza expandida das tensões de referência;
- $U(\sigma_N) =$                 incerteza expandida das tensões residuais normalizadas

Estas incertezas expandidas estão representadas nas Figuras 8.5, 8.8, 8.11, 8.14, 8.17 e 8.20 por duas faixas vermelhas e simétricas em relação ao valor esperado para a tensão normalizada  $\{+/-U(n)\}$  e são apresentadas na Figura 8.22.

FONTES DAS INCERTEZAS	Corpo de Prova	ERROS NAS TENSÕES			
		$\phi$ 0,8 mm		$\phi$ 1,6 mm	
		FACE 1	FACE 2	FACE 1	FACE 2
MÉTODO DO FURO E HE		13,5%	13,5%	12%	12%
VALOR DE REFERÊNCIA	Aço 1045	5%	11%	5%	11%
	Aço 4140	5%	10%	5%	10%
	Al 201	40%	40%	40%	40%
VALOR COMBINADO	Aço 1045	15%	17%	13%	16%
	Aço 4140	15%	17%	13%	16%
	Al 201	42%	42%	42%	42%

Figura 8.22 Incertezas expandidas relativas estimadas para a tensão normalizada, para furos de  $\phi$  0,8 mm ( $\phi$  0,8 a 1 mm) e de  $\phi$  1,6 mm ( $\phi$  1,6 a 2 mm). Valores relativos ao valor medido.



Quando os resultados experimentais, expressos através das tensões normalizadas, estão enquadrados dentro da faixa definida pela incerteza expandida da tensão normalizada, é possível concluir que as estimativas efetuadas para a incerteza da medição com holografia eletrônica não foram subestimadas.

Por outro lado, quando estes mesmos resultados não se enquadram dentro da faixa definida pela incerteza expandida das tensões normalizadas, este é um indício de que os valores das incertezas para a medição com holografia, e/ou para o valor de referência, foram subestimados.

Comparando os valores experimentais encontrados para as tensões principais normalizadas com as suas respectivas faixas de incertezas estimadas, pôde-se observar um bom enquadramento da maioria dos pontos de medição (Figuras 8.5, 8.8, 8.11, 8.14, 8.17 e 8.20).

Entretanto, quando estes resultados são analisados de forma mais rigorosa, esta conclusão pode não ser mais completamente válida. Se, por exemplo, for calculado o erro máximo associado a cada ponto dos gráficos das Figuras 8.6, 8.9, 8.12, 8.15, 8.18 e 8.21, dado pela soma entre a tendência (parcela sistemática) e o desvio padrão dos resultados experimentais multiplicado pelo respectivo coeficiente de Student, chega-se na tabela da Figura 8.23, válida para furos com profundidade de 2 mm. Em alguns dos casos, o erro máximo ultrapassa os limites das faixas de incerteza expandida estimada para as respectivas tensões normalizadas. Deve ser destacado que a quantidade de dados disponíveis para realizar uma análise estatística significativa é muito limitada. Por exemplo, para a face 2 do corpo de prova de aço 1045, dados de apenas dois ensaios estão disponíveis.

Prof. 2 mm	ERROS NAS TENSÕES $\sigma_1$			
Corpo de Prova	FACE 1		FACE 2	
	Un	Emáx	Un	Emáx
Aço 1045	15%	22%	17%	26%
Aço 4140	15%	13%	17%	14%
Al 201	42%	54%	42%	33%

Figura 8.23 .Comparação entre as incertezas expandidas das tensões normalizadas (Un) e os erros máximos (Emáx) para a profundidade de 2 mm. Valores relativos ao valor medido.



Esta tabela revela ainda que os valores calculados para o erro máximo dos resultados obtidos para o aço 4140 estão rigorosamente dentro dos limites previstos. Este é um bom indicio de que as estimativas de incerteza efetuada para holografia eletrônica são realistas.

Já para o aço 1045, esta condição não é obedecida. Para o segundo carregamento há apenas dois dados disponíveis, o que não permite uma estimativa realista para o erro máximo. No entanto, para o primeiro carregamento, há um conjunto de sete pontos. Este fato indica que provavelmente há um fator fora de controle nos ensaios ou cuja influência nos resultados foi subestimada. Não há uma indicação clara da causa provável, mas há indícios de que, nestes casos, a influência dos filtros passa-baixas aplicados nas imagens sobre os valores calculados para as tensões residuais seja maior que o previsto, em função da relação sinal/ruído ser muito menos favorável nestes ensaios em relação aos ensaios com o aço 4140. Deve ser levado em conta ainda que estes foram os primeiros ensaios realizados, e que a falta de experiência possa ter afetado mais fortemente alguns dos pontos, o que eleva a dispersão do conjunto de dados.

No caso dos experimentos realizados com os corpos de prova de alumínio os erros máximos das tensões normalizadas obtidas experimentalmente foram grandes, como também foram grandes as estimativas para as incertezas expandidas da tensão normalizada. Este fato é uma consequência do nível elevado de tensões residuais iniciais presentes no corpo de prova devido a este não ter sido recozido. Caso fossem conhecidos, *a priori*, os valores das tensões residuais iniciais em todos os pontos de medição, poderia ter sido feita uma correção, eliminando a parcela sistemática dos resultados. No entanto, em função da limitada área útil do corpo de prova, não foi possível realizar, em número suficiente, ensaios para determinar as tensões residuais iniciais para várias regiões do corpo de prova. Porém, com a análise dos gráficos percebe-se claramente que há uma parcela sistemática que, se conhecida, poderia ser corrigida. Com esta correção, pode-se verificar que o erro máximo destes resultados se enquadrariam dentro de uma faixa de 25%. O erro máximo, mesmo após esta eventual correção, ainda seria maior do que os valores encontrados para os corpos de prova de aço, provavelmente devido ao fato de que o alumínio apresenta menor usinabilidade, e está mais sujeito às novas tensões residuais induzidas pela furação.

As incertezas associadas as direções principais são muito baixas devido a característica do interferômetro ter sensibilidade radial. As incertezas presentes nos resultados são atribuídas ao posicionamento do corpo de prova sobre a bancada experimental.

## 8.5 CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES

Para favorecer a análise quantitativa da holografia eletrônica para a medição de tensões residuais, seria desejável obter valores de referência com incertezas da ordem de 3%. Para isto além das precauções já tomadas nos experimentos, ainda seria necessário: a) obter corpos de prova com níveis de tensões residuais iniciais inferiores a 5 MPa, b) calibrar os extensômetros instalados nos corpos de prova, c) utilizar apenas um carregamento para cada corpo de prova e d) melhorar a uniformidade da distribuição de tensões residuais no corpo de prova.

No presente está sendo desenvolvido um primeiro protótipo de um dispositivo de medição de tensões residuais com holografia eletrônica. Com este sistema, espera-se a redução de algumas das incertezas devido: a) à descentragem do eixo óptico com relação ao eixo do furo, b) à descentragem do anel de amostragem com relação ao eixo óptico, c) ao erro do fator de escala da imagem / erro no raio de amostragem, d) aos ruídos dos mapas de fase, e) ao processo de medição do diâmetro, f) ao controle das folgas radiais da broca, g) ao processo de controle da profundidade, h) ao controle das folgas axiais da broca, i) ao mecanismo de controle da ortogonalidade e j) aos processos de filtragem das imagens.

Acredita-se que a incerteza da técnica de medição de tensões residuais com o método do furo e holografia eletrônica poderia ser reduzida para algo em torno de 7%. Para tal seria necessário diminuir tanto as incertezas causadas pela técnica do furo e as pertinentes à holografia eletrônica para algo em torno de 5% cada. Para conseguir tal redução são necessárias reduções individuais em torno de 1/3 para algumas das fontes de incertezas críticas. Esta análise é feita na Figura 8.24, o que resulta numa incerteza combinada total equivalente à metade da incerteza original estimada na Figura 8.3. Na mesma Figura 8.24 são indicadas algumas reduções de incertezas para atingir 10% de incerteza combinada total.



ITEM	FONTES DE INCERTEZAS	INCERTEZAS NAS TENSÕES		INCERTEZAS NAS TENSÕES	
		6%		10%	
		FUROS DE 0,8 A 1 mm	FUROS DE 1,6 A 2 mm	FUROS DE 0,8 A 1 mm	FUROS DE 1,6 A 2 mm
1	INCERTEZAS DO MÉTODO DO FURO				
1.1	Diâmetro e cilindricidade do furo [mm]	1,5%	0,7%	2,3%	1%
1.2	Profundidade do furo [mm]	0,8%	0,3%	1,3%	0,5%
1.6	Tensões residuais induzidas pela furação	1,7%	1,7%	5%	5%
1.9	Coeficientes do furo cego (FEM)	1,7%	1,7%	5%	5%
1.10	Gradientes de tensões na profundidade	1,3%	1,3%	2	2
	Incerteza Combinada Parcial	4,6%	4,3%	8,4%	8,1%
2	INCERTEZAS DA HE.				
2.1	Descentragem do eixo óptico/furo [mm]	1,0%	1,0%	1,5%	1,5%
2.2	Descentr. Amostragem/eixo óptico[pixel]	1,3%	1,3%	2,0%	2,0%
2.2	Filtros passa-baixas na imagem	1,3%	1,3%	2,0%	2,0%
2.3	Ruído dos mapas de fase [nível cinza]	1,7%	1,0%	2,5%	1,5%
2.5	Fator de escala/raio de amostragem	0,3%	0,2%	0,5%	0,3%
	Incerteza Combinada Parcial	4,1%	3,1%	5,1%	4,1%
3	PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS			-	
	Erro Combinado Parcial	1%	1%	1%	1%
4	INCERTEZA COMBINADA TOTAL	6,2%	5,4%	10%	9,1%

Figura 8.24 Valores otimizados das incertezas de medição de tensões residuais com holografia eletrônica associada ao método do furo utilizando diâmetros da broca de 0,8 até 1 mm ou 1,6 a 2 mm.. Valores relativos ao valor medido.

## CAPÍTULO 9

# CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida e analisada uma nova metodologia de medição de tensões residuais com holografia eletrônica. Foi avaliado o processo de execução do furo, considerando ferramentas de pequeno diâmetro, com o objetivo de realizar medições localizadas. A formulação analítica e os coeficientes de correção para o caso de furo cego foram obtidos de informações da literatura. As influências das principais fontes de erros presentes na utilização do método do furo em combinação com a holografia eletrônica para medição de tensões residuais foram também analisadas.

Para a medição de tensões residuais com holografia eletrônica foi considerado um interferômetro radial. O tratamento das imagens, a amostragem do sinal pelo algoritmo do mínimo gradiente de fase, as fontes de erros específicas do interferômetro radial, a metodologia de determinação automática do centro do espelho do interferômetro e a quantificação propriamente dita das tensões residuais considerando o algoritmo dos mínimos quadrados com a compensação do nível de fundo e o algoritmo dos harmônicos, foram também apresentados e discutidos.

No processo de avaliação da incerteza da técnica, seus resultados foram comparados com o valor de referência dos campos de tensões produzidos experimentalmente em amostras livres de tensões e com valores de referência dos mapas de fases simulados numericamente.

Quando comparado com outras técnicas invasivas de medição de tensões residuais - inclusive o método do furo acoplado a extensometria, - a técnica analisada apresenta vantagens como o reduzido tempo gasto com a preparação da superfície da peça e instalação do sistema de medição. Também é de grande importância lembrar que devido ao fato de não ser necessário operações especiais de preparação da superfície, garante-se que o campo de tensões residuais não é afetado pelo processo de remoção de revestimentos e lixamento.



Do ponto de vista econômico, também é possível fazer algumas comparações entre estas duas técnicas. Realizando uma análise de custos, a técnica do furo cego acoplada a extensometria exige um investimento inicial da ordem de US\$10.500,00. Considerando apenas o material de consumo envolvido para cada ponto de medição tem-se um gasto de US\$30,00. A este custo devem ser somados os custos do tempo de preparação da superfície, do tempo de teste dos sensores, do tempo de remoção e reinstalação de eventuais rosetas com defeito, do tempo de alinhamento do dispositivo de furação, do tempo da furação propriamente dita e do tempo de medição do diâmetro do furo e o tempo de confecção de relatório envolvendo um técnico especializado. O custo total por ponto de medição pode variar de US\$100,00 a US\$210,00, dependendo da complexidade da peça a medir e da especialização do técnico envolvido. Já com o método de medição de tensões residuais com holografia eletrônica, estima-se que o custo inicial seja da ordem de US\$27.000,00. Considerando os custos do material e do tempo envolvido em cada ponto de medição, estima-se que o custo total por ponto medido varie em torno de US\$40,00 a US\$70,00. Considerando a realização de 200 (duzentos) ensaios de graus de dificuldade variados, pode-se dizer que os custos totais das duas técnicas se equivalem e que a partir deste instante a técnica de medição com holografia eletrônica apresenta-se como mais econômica.

Em síntese, pode-se condensar o presente trabalho em dois tópicos principais:

- a) A apresentação de um método de determinação de tensões residuais através da medição de deslocamentos radiais provocados pelo alívio de tensões após a execução de um furo;
- b) Validação do método através da simulação experimental de campos de tensões uniaxiais.

Neste contexto são válidas as seguintes afirmações:

**i) Quanto à execução do furo:**

- melhores condições de furação foram obtidas com brocas de 1,6 mm de diâmetro utilizando turbina pneumática de altíssima rotação;
- a furação com brocas de 0,6 à 0,8 mm de diâmetro é mais suscetível a desvios nas características geométricas do furo devido a menor rigidez da broca;
- O resultado da furação também é influenciado pelas características geométricas das brocas. Dos vários modelos e fabricantes- existentes, os que apresentam melhores resultados são os que possuem gumes propícios ao corte de topo, boa saída de cavaco e cujo corte favorece a autocentragem da ferramenta;

**ii) Quanto ao aparato experimental:**

- O dispositivo de simulação de tensões utilizado se demonstrou extremamente prático pois possibilitou: a) uma fácil fixação do corpo de prova sobre a bancada óptica, b) isolamento entre a bancada óptica e a bancada de carregamento, máquina de ensaio de tração e c) realizar carregamentos em corpos de prova de diferentes materiais;
- A maior dificuldade com o dispositivo de simulação de tensões foi conseguir carregamentos uniformes sem a presença de flexão;
- A maior dificuldade com os corpos de prova foi obter materiais livres de tensões residuais;
- A usinagem convencional em fresadora manual dificultou a colagem dos extensômetros devido ao acabamento superficial e ainda não eliminou totalmente pontos de concentração de tensões devido a não concordância satisfatória dos cantos arredondados com as faces planas;

**iii) Quanto aos algoritmos e procedimentos de quantificação:**

- A amostragem polar do sinal dos mapas de fases, utilizando o método do mínimo gradiente de fase, se demonstrou um método eficiente para o interferômetro radial e também para outros tipos de interferômetros utilizados com holografia eletrônica;
- O algoritmo de quantificação de campos de tensões pelo método dos mínimos quadrados é eficaz desde que utilizado com os coeficientes de correção para furo cego;
- O algoritmo dos harmônicos é útil para detectar efeitos de plastificação na borda dos furos ou a presença de fortes gradientes de tensões na superfície.
- O algoritmo de compensação do nível de fundo é essencial para corrigir as pequenas perturbações que ocorrem nos mapas de fase, permitindo quantificar adequadamente os campos de tensões;
- A realização de vários testes com os dados amostrados em coordenadas polares possibilita a rejeição automática de anéis de amostragem com dados espúrios;

**iv) Quanto ao resultados dos experimentos realizados:**

- Através dos ensaios experimentais foi avaliado o desempenho metrológico do método de medição de tensões residuais com holografia eletrônica. Foram validadas as metodologias envolvidas e os erros ficaram em níveis aceitáveis, ou seja, menores do que 25% dos valores medidos e menores do que 15% da tensão de escoamento dos materiais envolvidos. Estas incertezas são comparáveis com as de outras técnicas medição de tensões residuais;
- Para o aço liga 4140 simulou-se campo de tensões residuais da ordem de 40% da tensão de escoamento do material. Desconsiderando os resultados das pequenas profundidades, o maior erro absoluto para estas condições foi menor do que 18% e em relação a tensão de escoamento do material foi menor do que 7%;

- Para o aço 1045 simulou-se campo de tensões residuais da ordem de 50% e 70% da tensão de escoamento do material. Desconsiderando os resultados das pequenas profundidades, o maior erro absoluto para estas condições foi menor do que 20% e em relação a tensão de escoamento do material foi menor do que 10% para ambos os casos;
- Para a liga de alumínio simulou-se campo de tensões residuais da ordem de 60% da tensão de escoamento do material. Desconsiderando os resultados das pequenas profundidades e eliminando a parcela sistemática causada pelas tensões residuais iniciais, o maior erro absoluto para estas condições foi menor do que 25% e em relação a tensão de escoamento do material foi menor do que 15%.;
- As incertezas associadas aos valores das direções principais são muito baixas devido a característica do interferômetro ser radial.
- A incerteza da técnica de medição depende dos materiais sendo medidos: materiais de baixa usinabilidade possuem a tendência de apresentar maiores erros devido as tensões residuais induzidas pelo processo de furação. Alumínio e aço inoxidável são exemplos;

#### **v) Quanto à aplicabilidade do método**

- A técnica também pode ser utilizada qualitativamente, pois visualmente fornece informações úteis a respeito dos níveis de tensões residuais presentes através da quantidade de franjas e também permite a identificação instantânea das direções principais do campo de tensões residuais;
- Por permitir a concepção de interferômetros compactos e robustos, o método de medição de tensões residuais com holografia eletrônica se demonstrou potencialmente promissor com respeito à análise em campo, devido sua robustez, rapidez de montagem e facilidade de aquisição do sinal;
- Ensaios de medição de tensões residuais podem ser utilizados de forma extensiva para verificar a eficácia de tratamentos térmicos, problemas gerados com a deposição de material por processos de soldagem e estado de solicitação mecânica de qualquer componente além de muitas outras aplicações;
- O fator tempo na realização de ensaios de inspeção de manutenção é muito importante; a nova técnica de medição utilizando holografia eletrônica possibilita realizar maior quantidade de ensaios num tempo muito menor, além de apresentar uma confiabilidade maior nos resultados. Este fator abre caminho para um maior controle das tensões residuais presentes em componentes diversos.

**SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- a) Maior quantidade de ensaios com campos de tensões uniaxiais em corpos de prova livres de tensões residuais, com carregamento uniforme e materiais diferentes;
- b) Testes com campos de tensões residuais biaxiais;
- c) Testes com campos de tensões residuais variáveis ao longo da profundidade;
- d) Testes com campos de tensões residuais variáveis no plano;
- e) Aperfeiçoamento do dispositivo de avanço e controle de profundidade da ferramenta;
- f) Aperfeiçoamento do método de medição do diâmetro do furo executado;
- g) Estudo aprofundado dos efeitos das deformações plásticas ao redor do furo considerando campos de tensões residuais próximos da tensão de escoamento do material.



## CAPÍTULO 10

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]  
ASTM E6 "American Society for Testing of Materials", Annual Book of ASTM Standards, Section 3, V. 03.01, Metals - Mechanical Testing, Standard Definitions of Terms Relating to Methods of Mechanical Testing, p. 131, 19. residual stress, 1987
- [2]  
Row Lands, Robert E. "Residual stresses" in Handbook on Experimental Mechanics, edited by Kobayashi, A. S., Prentice-Hall, Inc., New Jersey USA, pp. 768-813, 1987
- [3]  
Beghini, M.  
Bertini, L. "Residual stress modeling by experimental measurements and finite element analysis" in Journal of Strain Analysis, vol. 25, n. 2, p. 103-108, 1990
- [4]  
Masubuchi, Koichi "Analysis of Welded Structures" Pergamon Press: International series on materials science and technology, p. 33, 1980.
- [5]  
Dr. Jian Lu "Handbook of Measurement of Residual Stresses" Society for Experimental Mechanics, Inc., The Fairmont Press, Inc. 1996
- [6]  
Prevey, Paul S. "X-ray Diffraction Residual Stress Techniques", Lambda Research Inc. in Advances in Material Technology: Monitor Issue n. 15, Non-Destructive Material Testing, UNIDO, pp. 64-72, November, 1989
- [7]  
Sarabanda, J. V. L. "Avaliação não destrutiva de tensões residuais por raio-X" Revista dos Ensaio Nao Destrutivos, p. 41-43, 1987.
- [8]  
Ruud, C. O.  
Chen, P. C. "Application of an advanced XRD instrument for surface stress-tensor measurements on steel sheets" in Experimental Mechanics, p. 245-250, September 1985
- [9]  
French, D. N.  
MacDonald, B. A. "Experimental method of X-ray stress analysis" in Experimental Mechanics, p. 456-462, October 1969

- [10]  
Stacey, A.  
MacGillivray, H. J.  
Webster, G. A.  
Webster, P. J.  
Ziebeck, K. R. A.  
"Measurement of residual stresses by neutron diffraction" in Journal of Strain Analysis, p. 93-100, vol. 20, n. 2, 1985
- [11]  
Yelon, W. B.  
Ross, F. K.  
Krawitz, A. D.  
"Neutron Diffraction"  
in ASM Handbook, V.10 p. 420-426, 1995
- [12]  
Smith, D. J.  
et all  
"Neutron diffraction measurements of residual stress and plastic deformation in an aluminium alloy weld" in Journal of Strain Analysis, vol. 23, n. 4, p. 201-211, 1988
- [13]  
Majumdar, S.  
Krawitz, A. D.  
et all  
"Aplication of neutron diffraction to measure residual strains in various engineering composite materials" in Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 113, p. 51-59, january, 1991
- [14]  
Smith, D. J.  
et all  
"Neutron diffraction measurements of residual stress and plastic deformation in an aluminium alloy weld" in Journal of Strain Analysis, vol 23, n 4, p. 201-211, 1988
- [15]  
Abuku, S.  
Cullity, B.D.  
"A magnetic method for the determination of residual stress" in Experimental Mechanics, p. 217-223, May 1971
- [16]  
Fukuoka, H.  
Toda, H.  
Yamane, T.  
"Acoustoelastic stress analysis of residual stress in a patch-welded disk" in Experimental Mechanics, p. 277-280, July 1978
- [17]  
Blessing, G. V.  
Hsu, N. N.  
Proctor, T. M.  
"Ultrasonic-shear-wave measurement of known residual stress in aluminum" in Experimental Mechanics, p. 218-222, September 1984
- [18]  
Dike, J. J.  
Johnson, G. C.  
"Residual stress determination using acoustoelasticity" in Journal of Applied Mechanics, p. 12-17, vol. 57, March 1990
- [19]  
Fukuoka, H.  
Toda, H.  
Naka, H.  
"Nondestructive residual-stress measurement in a wide-flanged rolled beam by acoustoelasticity" in Experimental Mechanics, p. 120-128, March 1983

- [20]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"Examination of the computational model for the layer-removal method for residual-stress measurement" in *Experimental Mechanics*, p. 150-154, June 1986
- [21]  
Allong, C.  
Munro, M.  
"Evaluation of the radial-cut method for determining residual strains in fiber composite rings" in *Experimental Techniques*, p. 55-58, January-February 1991
- [22]  
Tebedge, N.  
Alpsten, G.  
Tall, L.  
"Residual-stress measurement by the sectioning method" in *Experimental Mechanics*, p. 88-96, February 1973
- [23]  
Kang, K. J.  
Song, J. H.  
Earmme, Y. Y.  
"A method for the measurement of residual stresses using a fracture mechanics approach" in *Journal of Strain Analysis*, vol. 24, n. 1, 1989
- [24]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
Vardar, O.  
"Measurement of residual stresses near the surface using the crack compliance method" in *Journal of Engineering Materials and Technology*, p. 199-204, vol. 113, April 1991
- [25]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"Measurement of residual hoop stresses in cylinders using the compliance method" in *Journal of Engineering Materials and Technology*, p. 87-92, vol. 108, April 1986
- [26]  
Underwood, J. H.  
"Residual-stress measurement using surface displacements around an indentation" in *Experimental Mechanics*, p. 373-380, September 1973
- [27]  
Hung, Y. Y.  
Long, K. W.  
Hovanesian, J. D.  
"Fast detection of residual stresses in an industrial environment by electronic sherography" in *Hologram Interferometry and Speckle Metrology Proceedings Society for Experimental Mechanics*, Baltimore, 1990
- [28]  
Hathaway, R. B.  
Hovanesian, J. D.  
Hung, M. Y. Y.  
"Residual stress evaluation using sherography with large shear displacements" in *SPIE*, vol. 1554 B, p. 725-735, 1991
- [29]  
Measurement Group  
"Residual stress measurement"  
"Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method", in *TN-503-3 Tech Note*, p. 1-19, 1988

- [30] Mathar, J. "Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes", Trans. ASME, 56, pg. 249-254 - 1934
- [31] Kelsey R. A. "Measuring non-uniform residual stresses by hole drilling method" Proc. SESA, XVI (1), pg 181-194 (1956)
- [32] N. J. Rendler  
J. Vigness "Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses", Experimental Mechanics, pg 577-586, december 1966
- [33] Schajer, G.S. "Application of finite element calculations to residual stress measurements" in Journal of Engineering Materials and Technology, p. 157-163, vol. 103, April 1981
- [34] M. Hetényi "Brittle Models and Brittle Coatings", in "Handbook of experimental stress analysis" pp. 658, edited by M. Hetényi, John Wiley & Sons, Inc. 1966
- [35] Lu, J.  
Flavenot, J.F. "Applications of the incremental hole-drilling method for measurement of residual-stress distribution" in Experimental Techniques, p. 18-24, november, 1989
- [36] Albertazzi G.J., A.  
Augusto Araújo  
Pablo Muños "Análise de Tensões Residuais em um Tubo de Aço por Meio de Extensometria e Holografia Eletrônica" - Anais do VII SIBRAT- Florianópolis, 10/1992
- [37] Albertazzi G.J., A.  
Sciammarella, C.A. "Measurement of residual stresses by the moiré method" - Anais do Spring Meeting of the Society for Experimental Mechanics - Albuquerque, USA - 5/1990
- [38] Kirsch, G. "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, VDI-Z, vol 42, n. 29, pg. 797-807 (jul 1898)
- [39] Cook, R. D.  
Young, W. C. "Advanced Mechanics of Materials", Nacmillan Publishing Company ISBN 0-02-324620-0, pg. 61 - 2.7 Kirsch Solution, 1985
- [40] Schajer, G. S. "Strain data averaging for the hole-drilling method" in Experimental Techniques, p. 25-28, March-April 1991



- [41]  
ASTM E 837-89  
"Determining residual stresses by the hole drilling strain-gage method", ASTM Standard E837-89, American Society for testing and Material, 1989.
- [42]  
Kabiri, M.  
"Nonuniform residual-stress measurement by hole-drilling method" in *Experimental Mechanics*, p. 328-336, December 1984
- [43]  
Wanh, Hsin-Pang  
"The alignment error of the hole-drilling method" in *Experimental Mechanics*, 23-27, January 1979.
- [44]  
Bynum, J. E.  
"Modifications to the hole-drilling technique of measuring residual stress for improved accuracy and reproducibility" in *Experimental Mechanics*, 21-33, January 1981.
- [45]  
Kabiri, M.  
"Toward more accurate residual-stress measurement by the hole-drilling method: analysis of relieved-strain coefficients" in *Experimental Mechanics*, 14-21, March 1986.
- [46]  
Tieu, A. K.  
"A direct method to evaluate hole-alignment error in residual-stress measurement", in *Experimental Mechanics*, 43-47, March 1985.
- [47]  
Kabiri, M.  
"Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influences of transverse sensitivity of the gages and relieved-strain coefficients" in *Experimental Mechanics*, 252-256, September 1984.
- [48]  
Ajovalasit, A.  
"Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influence of hole eccentricity" in *Journal of Strain Analysis*, 171-178, vol 14, n. 4, 1979.
- [49]  
Perry, C. C.  
"Data-reduction algorithms for strain-gage rosette measurements" in *Experimental Techniques*, 13-18, May 1989.
- [50]  
Measurements Group, Inc.  
Guia de Furação "Modelo RS200 " e Rosetas  
P.O. Box 27777 - Raleigh, NC 27611 USA

- [51]  
Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH  
Postfach 4235 Im Tiefen See 45 - D-6100 Darmstadt 1
- [52]  
Bush, A. J.  
Kromer, F. J.  
"Simplification of the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement", ISA Trans., 12 (3), 249-259, 1973
- [53]  
J. W. Dally  
W. F. Riley  
Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill, 1978
- [54]  
Daniel, Post  
"Moiré interferometry: Advance and aplications" in Experimental Mechanics, p. 276-280, Setember 1991
- [55]  
Nicoletto, Gianni  
"Moire interferometry determination of residual stresses in the presence of gradients" in Experimental Mechanics, p. 252-256, September 1991
- [56]  
Albertazzi G.J., A.  
"Determinação de tensoes residuais localizadas através de moiré assistida por TV" Anais do XI Cobem - São Paulo, SP -12/1991
- [57]  
Nelson, D.V. McCrickerd, J. T.  
"Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blind-hole drilling" in Experimental Mechanics, p. 371-378, december, 1986.
- [58]  
Yang Jiahua  
"Study on welding residual stress by laser holography interference" in SPIE, vol. 1554 B, p. 155-160, 1991
- [59]  
Hung, Y. Y.  
"Electronic shearography versus ESPI for noudes trutive evaluation" in SPIE, vol. 1554 B, p. 692-700, 1991
- [60]  
Jin, G. C.  
Tang, S. H.  
"Aplications of eletronic speckle and speckle shearing pattern interferometry to measurements of material behavior and nondestructive testing" in Society for Experimental Mechanics 1991
- [61]  
Troncoso,L.H.S.  
"Desenvolvimento de um Sistema Ativo de Estabilização para Holografia Eletrônica", Exame de Qualificação apresentado na UFSC, Florianópolis 1994

- [62]  
Flaman, M. T.  
"Brief investigation of drilling stresses in the center-hole method of residual-stress measurement" in *Experimental Mechanics*, p. 26-30, January 1982
- [63]  
Weng, C. C.  
Lin, Y. C.  
Chou, C. P.  
"A new approach for determining the induced drilling stresses in the hole-drilling method of residual-stress measurement" in *Experimental Techniques*, p. 33-35, September]October 1992
- [64]  
Phillips, R. W.  
"Materiais Dentários de Skinner", *Mecânica do Corte com Brocas Dentárias*, Cap. 35, 8º edição, Editora Guanabara Koogon S.A., 1985
- [65]  
Flaman, M. T.  
Herring, J. A.  
"Comparison of four hole-producing techniques for the center-hole residual-stress measurement method" in *Experimental Techniques*, p. 30-32, August 1985
- [66]  
Witt, F.  
Lee, F.  
Rider, W.  
"A comparison of residual-stress measurements using blind-hole, abrasive-jet and trepan-ring methods" in *Experimental Techniques*, p. 41-44, February 1983
- [67]  
E. Procter  
E. M. Beaney  
"Recent Developments in Center-Hole Technique for Residual Stress Measurement"- Society for Experimental Mechanics, pg. 40-49, 1981
- [68]  
Flaman, M. T.  
Herring, J. A.  
"Ultra-high-speed center-hole technique for difficult machining materials" in *Experimental Techniques*, p. 34 e 35, January 1986
- [69]  
Mohammad Tootbonian  
Gary S. Schajer  
"Enhanced Sensitivity Residual Stress Measurements Using Taper Hole Drilling" in *Proceedings of the Fourth International Conference on Residual Stresses*, pp.52-62 Baltimore, Maryland USA, June 8-10, 1994
- [70]  
T. J. Whitney  
G. J. Stenger  
"A device for implementing the strain gage-hole drilling method of residual stress measurement on aircraft transparencies" *Experimental Techniques*, pg 25-30 July/August 1993.
- [71]  
Reinhall, P. G.  
Storti, D. W.  
"Modeling and analysis of the dynamics of a drill penetrating a thin plate" in *Journal of Applied Mechanics*, p. 690-694, vol. 53, September 1986

- [72]  
Lin, Z-C.  
Lin, Y-Y.  
Liu, C.R.  
"Effect of thermal load and mechanical load on the residual stress of a machined workpiece" Int. J. Mech. Sci., vol. 33, no 4, pg. 263-278, 1991
- [73]  
Wiesner, C.  
"Residual stresses after orthogonal machining of AISI 304: Numerical calculation of the thermal component and comparison with experimental results" Metallurgical Transactions A, Volume 23A, pg. 989-996, march 1992
- [74]  
Ferramenta 1 DENTSPLY, 33 1/2 Carbide, USA  
Ferramenta 2 SSWHITE, 33 1/2 Carbide, USA  
Ferramenta 3 MALEIFER, 33 1/2 Carbide, Suíça  
Ferramenta 4 MEISINGER, 33 1/2 Carbide, Alemanha  
Ferramenta 5 LABOR DENT, 33 1/2 Carbide, USA  
Ferramenta 6 ATC-200-031, Measurement Group, USA  
Ferramenta 7 ATC-200-031, Measurement Group, USA  
Ferramenta 8 SORENSEN, 33 1/2 Diamantada, Brasil  
Ferramenta 9 JOTA, 33 1/2 Steel, Suíça  
Ferramenta 10 BUSCH, 33 1/2 Steel, Alemanha  
Ferramenta 11 ATC-200-062, Measurement Group, USA
- [75]  
Coutinho, G.S.  
"Técnicas Híbridas para análise de Tensões combinando Elementos Finitos e Holografia Eletrônica", Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 06/12/1993
- [76]  
De Souza, A.R.  
"Desenvolvimento de uma Técnica de Ensaio-não-Destrutivo utilizando Holografia Eletrônica para detecção de defeitos em cilindros revestidos com borracha", Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 02/09/ 1994
- [77]  
Assuiti, C.H.  
"Metrologia Integrada para medição da forma geométrica, deslocamentos, deformações e tensões em Superfícies não Planas através da Holografia Eletrônica", Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 02/09/1994
- [78]  
Albertazzi Jr., A.  
"Automatização da Medição de Deslocamentos pela Holografia Interferométrica" Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 04/05/1984.
- [79]  
Vest, C.M.  
"Holographic Interferometry", John Wiley & Sons, 1979



- [80]  
Jones, R.  
Wykes, C.  
"Holographic and Speckle Interferometry", Cambridge University Press, 1989
- [81]  
Creath, Katherine  
"Phase-Shifting Speckle Interferometry" Applied Optics 24, n. 18, pg. 3053-3058, September 1985.
- [82]  
Kapp, Walter A.  
"Otimização do Desempenho Metrológico do Sistema de Medição Estação Holográfica" Dissertação de Mestrado apresentada na UFSC, CPGEM, Florianópolis, 16/04/1997
- [83]  
Creath, K.  
"Phase Measurements Techniques for NOT" Proceedings - Hologram Interferometry and Speckle Metrology, pag. 473-479, november 1990.
- [84]  
Albertazzi Jr., A.  
"Determination of displacement, strains and rotations from holographic interferometry using a 2D fringe order function" Simpósio do SPIE de 1993, Interferometria II: Conferência de aplicações, San Diego, Califórnia, EUA, julho de 1993
- [85]  
Relatório Pesquisa Parcial 1 - Projeto PADCT/CERTI  
"Desenvolvimento de Módulos Aplicativos Industriais para o Sistema Estação Holográfica" 21/09/95 a 21/03/96, CERTI - Florianópolis, 95p., Março/1996.
- [86]  
Relatório Pesquisa Parcial 2 - Projeto PADCT/CERTI  
"Desenvolvimento de Módulos Aplicativos Industriais para o Sistema Estação Holográfica" 22/03/96 a 21/09/96, CERTI - Florianópolis, 190 p., Set/1996.
- [87]  
Relatório Pesquisa Parcial 3 - Projeto PADCT/CERTI  
"Desenvolvimento de Módulos Aplicativos Industriais para o Sistema Estação Holográfica", CERTI - Florianópolis, 22/09/96 a 21/03/97
- [88]  
Albertazzi, A.  
Kanda C.  
Better J.  
"Adequação de um interferômetro radial para medição de tensões residuais por meio da holografia eletrônica", p. 19-26 III Simpósio de Análise Experimental de Tensões - ABCM - Rio de Janeiro, 12/95
- [89]  
Makino, A.  
Nelson, D. V.  
"Determination of sub-surface residual stress profiles by holographic-hole drilling method" Proc. VIII International Congress on Experimental Mechanics, Nashville, Tennessee, June 10-13, 1996.

- [90]  
Schajer, G. S.  
"Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I - Stress calculation procedures" in *Journal of Engineering Materials and Technology*, p. 338-343, vol. 110, October 1988
- [91]  
Schajer, G. S.  
"Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part II - Practical application of the integral method" in *Journal of Engineering Materials and Technology*, p. 344-349, vol. 110, October, 1988
- [92]  
Makinde, A.  
"Development of an Apparatus for Biaxial Testing Using Cruciform Specimens", *Experimental Mechanics*, June 1992, pg. 138-144.
- [93]  
Makinde, A.  
"Design of a Biaxial Extensometer for Mesuring Strains in Cruciform Specimens", *Experimental Mechanics*, pg. 132-137, June 1992.
- [94]  
El Sayed, M. M.  
"A New Approach for the Determination of Residual Stresses in Biaxially Stressed Plates", *Journal of Strain Analysis*, Vol.28 no.3, pg. 181-186, 1993.
- [95]  
Nelson, D. V.  
Fuchs , E. A.  
Makino, A.  
Willians, D. R.  
"Residual stresses determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling, Part II: Experiments", *Experimental Mechanics*. Vol. 34, n.1 p. 79-88, 1994
- [96]  
Parsons, M. W. and  
Pascoe, K. J.  
"Development of a Biaxial Fatigue Testing Rig", *Journal of Strain Analysis*, Vol 10 no. 1, pg. 1-9, 1975.
- [97]  
Hayhurst, D. R.  
"A Biaxial-Tension Creep-Rupture Testing Machine", *Journal of Strain Analysis*, Vol 8 no[77]. 2, pg. 119-123, 1973.
- [98]  
Johnson, A. E. and  
Khan, B.  
"A Biaxial-Stressing Creep Machine and Extensometer" *Proc. Instn. Mech, Engrs.*, vol 180, Pt 3A, pg. 318-323, 1966.
- [99]  
Kelly, D. A.  
"Problems in Creep Testing under Biaxial Stress Systems", *Journal of Strain Analysis*, Vol 11 no. 1, pg. 1-6, 1976.

- [100]  
Hopper, C. D. and  
Miller, K. J. "Fatigue Crack Propagation in Biaxial Stress Fields", Journal of Strain Analysis, Vol 12 no. 1, pg. 23-25, 1977.
- [101]  
Hawong, J. S. "Dynamic Crack Curving and Branching Under Biaxial Loading", Experimental Mechanics, pg. 146, June 1987.
- [102]  
Mönch, E. and Galster, D. "A method for producing a defined uniform biaxial tensile stress field", J. Appl. Phys, vol 14, pg. 810-812, 1963.
- [103]  
Flaman, M.T.  
Boag, J.M. "Comparison of residual-stress variation with depth-analysis techniques for the hole-drilling method" in Experimental Mechanics, p. 352-355, december, 1990
- [104]  
Albertazzi, A.  
Kapp, Walter; Manzolli, A. "Estação Holográfica : Uma nova ferramenta para a Mecânica Experimental". Anais do 7º SIBRAT, 10/1992
- [105]  
Lukasiewicz, S.A.  
Stanuszek, M. and  
Czyz, J.A. "Filtering of the Experimental Data in Plane Stress and Strain Fields", Experimental Mechanics, pag. 139-147, June 1993.
- [106]  
J. LU "Limitation of the ASTM standard for residual stress measurement by incremental hole drilling method", Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Spring Conference and Exhibits, Baltimore - Maryland, USA, 1994
- [107]  
G. Roy "The effect of specimen thickness on the accuracy of residual stress determination by hole drilling method", Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Spring Conference and Exhibits, Baltimore - Maryland, USA, 1994.
- [109]  
Albertazzi Jr., A. "Medição de Microdeslocamentos Tridimensionais e Deformação pela Holografia Interferométrica Autocalibrada" Tese de Doutorado, Engenharia Mecânica - UFSC/ CPGEM, Florianópolis, 28 de abril 1989.
- [110]  
CERTI - Relatório "Estação Automática de Medição de Deslocamentos, Deformações e Tensões por Princípios Holográficos". CERTI (Projeto FINEP/PADCT), Florianópolis, 1989.
- [111]  
CERTI - Relatório "Módulos Aplicativos para Estação Holográfica". CERTI (Projeto FINEP/PADCT), Florianópolis, 1995.

- [112]  
CERTI - Relatório  
“Evolução da Estação de Medição por Holografia Eletrônica” (Projeto FBB) CERTI, Florianópolis, 1994
- [113]  
Albertazzi Jr., A.  
“SINTHE 3.0C : Instruções de utilização” CERTI/LABMETRO, Florianópolis, 1993.
- [114]  
Albertazzi Jr., A.  
Kapp, W. A.  
Manzoli, A.  
“Um sistema prático para aplicação da holografia eletrônica na análise experimental de tensões” Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica- Punta Arenas, Chile , 11/1992.
- [115]  
Albertazzi Jr., A.  
“Generalized least squares approach to compute displacements, strains and rotations from combined single and/or double illumination holographic interferometry” Simpósio do SPIE de 1993, Interferometria II: Conferência de aplicações, San Diego, Califórnia, EUA, julho de 1993.
- [116]  
Makino, A.  
Nelson, D.  
“Residual-stress determination by single-axis holographic interferometry and hole drilling - Part I: Theory” - Experimental Mechanics, vol 34, n. 1, p. 66-78, Mar 1994.
- [117]  
Nelson, D. V.  
Fuchs , E. A.  
Makino, A.  
“An overview of the holographic-hole drilling technique for residual stress measurement” in Proceedings of the fourth international conference on residual stresses, pp.63-72 June 8-10, 1994 Baltimore, Maryland USA, June 8-10 1994. Baltimore, Maryland USA
- [118]  
Makino, A.  
Nelson, D. V.  
Fuchs , E. A.  
Williams, D. R.  
“Measurement of biaxial residual stresses with the holographic-hole drilling technique” Proc. 1993 Society for Experimental Mechanics Spring Conf. On Experimental Mechanics, Dearborn, SEM, Bethel, CT, 1993, p. 482-491
- [119]  
Albertazzi, A. G.  
Rodacoski, M. R.  
“Algoritmos para Quantificação de Tensões Residuais por Holografia Eletrônica Usando um Interferômetro Radial” , VI Simpósio de Análise Experimental de Tensões, pp 121-124, ABCM, Rio de Janeiro, 11/1996.
- [120]  
Albertazzi, A. G.  
Rodacoski, M. R.  
“Residual Stresses Measurement Using a Radial Interferometer - a preliminary Analysis” VIII International Congress on Experimental and Applied Mechanics” pp. 27-28, Society of Experimental Mechanics - SEM Nashville, Tennessee, USA - 1996.



- [121]  
Rodacoski, M. R.  
"Medição de Tensões Residuais Localizadas Através do Método do Furo Cego e Holografia Eletrônica (ESPI)", Exame de Qualificação de Doutorado, UFSC/CPGEM, Florianópolis, 1995.
- [122]  
Rodacoski, M. R.;  
Stenzel, J. N.,  
Botelho, J. X.  
"Medição de Tensões Residuais em Rotores de Turbinas Hidráulicas" V Semel- Seminário de Materiais do Setor Elétrico, Curitiba - PR, agosto, 1996.
- [123]  
Rodacoski, M. R.;  
Weingartner W. L.,  
Albertazzi, A. G. Jr.;  
"Obtenção de Furos por Usinagem para Medição de Tensões Residuais" VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, pg 497-506, Santiago - Chile, nov. 1994.
- [124]  
Albertazzi, A. G.;  
Kapp, W. A.;  
Rodacoski, M. R.;  
"Concepção Básica de uma Estação de Medição de Deslocamentos, Deformações e Tensões por Princípios Holográficos", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica -Anais do XI COBEM - Vol.B., São Paulo - 12/1991.
- [125]  
Nondestructive Testing  
Handbook  
"Nondestructive Testing Technique Catalog", V. 3, Radiography and Radiation Testing, p. 13-61, in Nondestructive Testing Handbook, 2ª. edição, American Society for Nondestructive Testing.
- [126]  
Hoffmann, K.  
"An Introduction to Measurements using strain Gages" HBM publication , p.265, 1989.
- [127]  
Hoffmann, K.  
"The Strain Gauge a Universal Tool of the Experimental Stress Analysis" HBM publication - p.25, 1989.
- [128]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"Examination of the computational model for the layer-removal method for residual-stress measurement" in Experimental Mechanics, pp 150-154, June 1986
- [129]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"Measurement of residual hoop stresses in cylinders using the compliance method" in Journal of Emgineering Materials and Tecnology, pp 87-92, vol. 108, April 1986
- [130]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
Vardar, O.  
"Estimation of axisymmetric residual stresses in a long cylinder" in Journal of Engineering Materials and Technology, 137-140, vol. 114, April 1992.

- [131]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
Vardar, O.  
"Measurement of residual stresses near the surface using the crack compliance method" in Journal of Engineering Materials and Technology, pp 199-204, vol. 113, April 1991
- [132]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"A method for measurement of axisymmetric axial residual stresses in circumferentially welded thin-walled cylinders" in Journal of Engineering Materials and Technology, pp 181-185, vol. 107, July 1985
- [133]  
Chiu, Cheng Ping  
Hsieh, Min Chin  
"The Correlation Between The Residual Stresses of ABS Terpolymers and Injection Molding Conditions" in Journal of Engineering Materials and Technology, 171-175, vol. 109, april 1987
- [134]  
Cheng, W.  
Finnie, I.  
"A new method for measurement of residual axial stresses applied to a multi-pass butt-welded cylinder" in Journal of Engineering Materials and Technology, 337-342, vol. 109, October 1987.
- [135]  
Rybicki, E. F.  
McGuire, P. A.  
"The effect of induction heating conditions on controlling residual stresses in welded pipes" in Journal of Engineering Materials and Technology, 267-273, vol. 104, October 1982.
- [136]  
Rybicki, E. F.  
Shadley, J. R.  
"A three-dimensional finite element evaluation of a destructive experimental method for determining through-thickness residual stresses in girth welded pipes" in Journal of Engineering Materials and Technology, 99-106, vol. 108, April 1986.
- [137]  
Rybicki, E. F.  
et all  
"Experimental and computational residual stress evaluation of a weld clad plate and machined test specimens" in Journal of Engineering Materials and Technology, 297-304, vol. 110, October 1988.
- [138]  
Hospers, F.  
Vogelesang, L. B.  
"Determination of residual stresses in aluminum-alloy sheet material" in Experimental Mechanics, pp 107-110, March 1975
- [139]  
Nishimura, T.  
"Analysis of axially symmetrical residual stresses in bars and tubes" in Experimental Mechanics, 180-184, May 1978.

[140]

Mittal, R. K.  
Khan, J. A.

"A comparative study of two experimental techniques for the measurement of residual stresses in circular rods and tubes of perspex" in *Journal of Strain Analysis*, vol. 24, n. 3, pp 163-171, 1989

[141]

F. J. Hua  
G. R. Fu  
H. D. Jun  
J. X. Qing

"The applications of the nondestructive residual stress measurement by eletricity" in *Proceedings of the fourth international conference on residual stresses*, pp.317-323 June 8-10, Baltimore, Maryland USA, 1994.

[142]

Christiaan P. Burger

"Photoelasticity" in *Handbook on Experimental Mechanics*, edited by Kobayashi, A. S., Prentice-Hall, Inc., New Jersey USA, pp. 162-281, 1987.

[143]

Horger, Oscar

"Residual Stresses" Cap. 11 in "*Handbook of experimental stress analysis*" edited by M. Hetényi, John Wiley & Sons, Inc., pp. 459-578, 1966.

[144]

G. Roy  
D. Kiff  
P. Hunt  
G. Crawford

"The effect of Quenching and Tempering on Residual Stress Distribution in Seamless Pipes" in *Proceedings of 1991 Spring Conference and Exhibits, SEM - Society for Experimental Mechanics, Inc.*, pp 378-385, 1991.

[145]

E. F. Rybicki  
J. R. Shadley  
W. S. Shealy

"A consistent splitting model for experimental stress analysis of pipes and plates" in *Proceedings of 1981 Spring Conference and Exhibits, SEM - Society for Experimental Mechanics, Inc.*, pp 27-31, 1981.

[146]

Albertazzi G.J., A.  
Rui Seara  
Policarpo B. Uliana

"A New Amplitude Weighted Filtering Technique for Noise Reduction in Images with 2p Phase Jumps" - *Anais do 1993 SPIE's Anual Meeting; conferência: Interferometry: Techniques and Analysis - San Diego, USA, 7/1993*

# ANEXO A



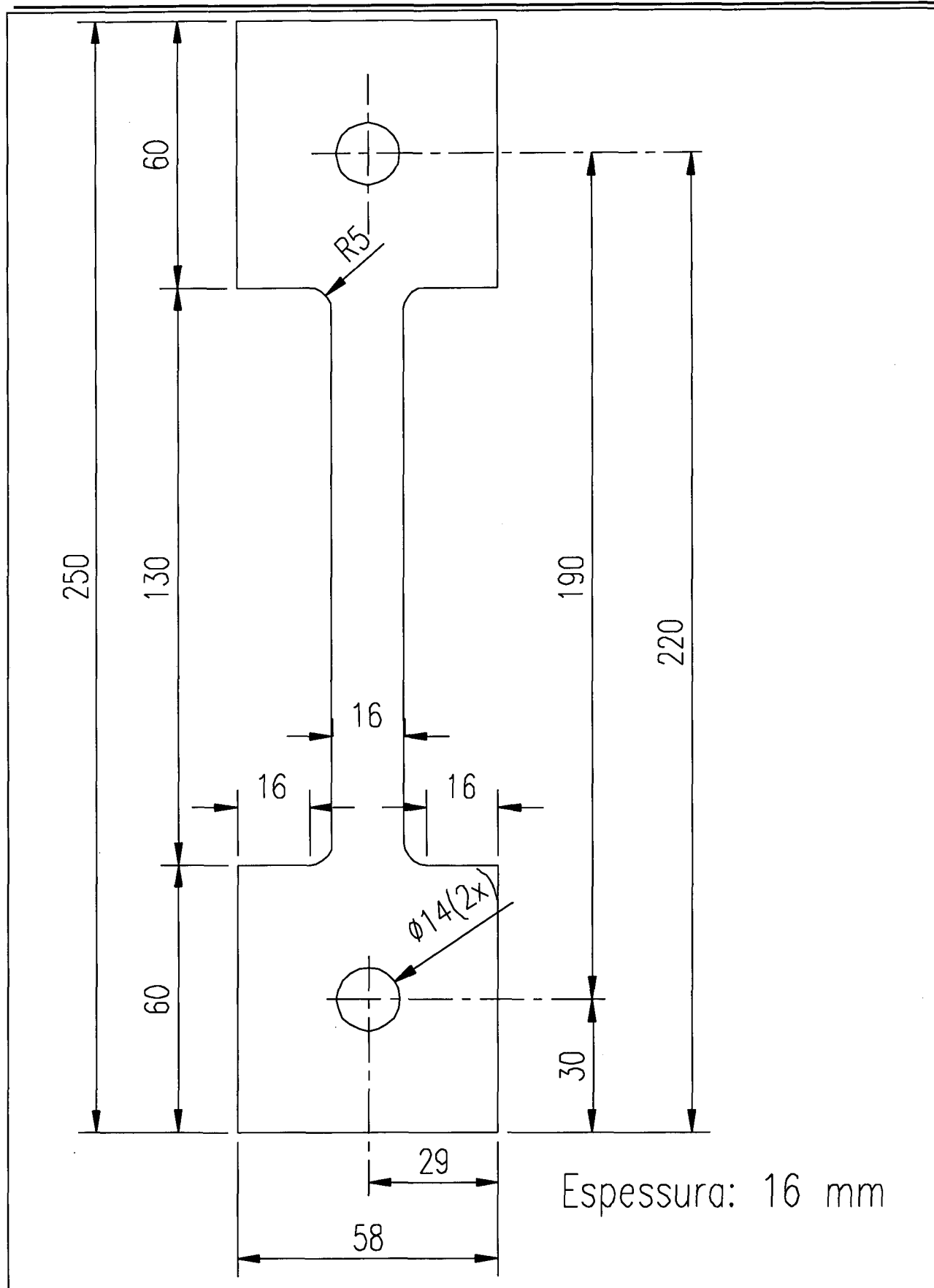


Figura A.1 Dimensões do corpo de prova - [mm].

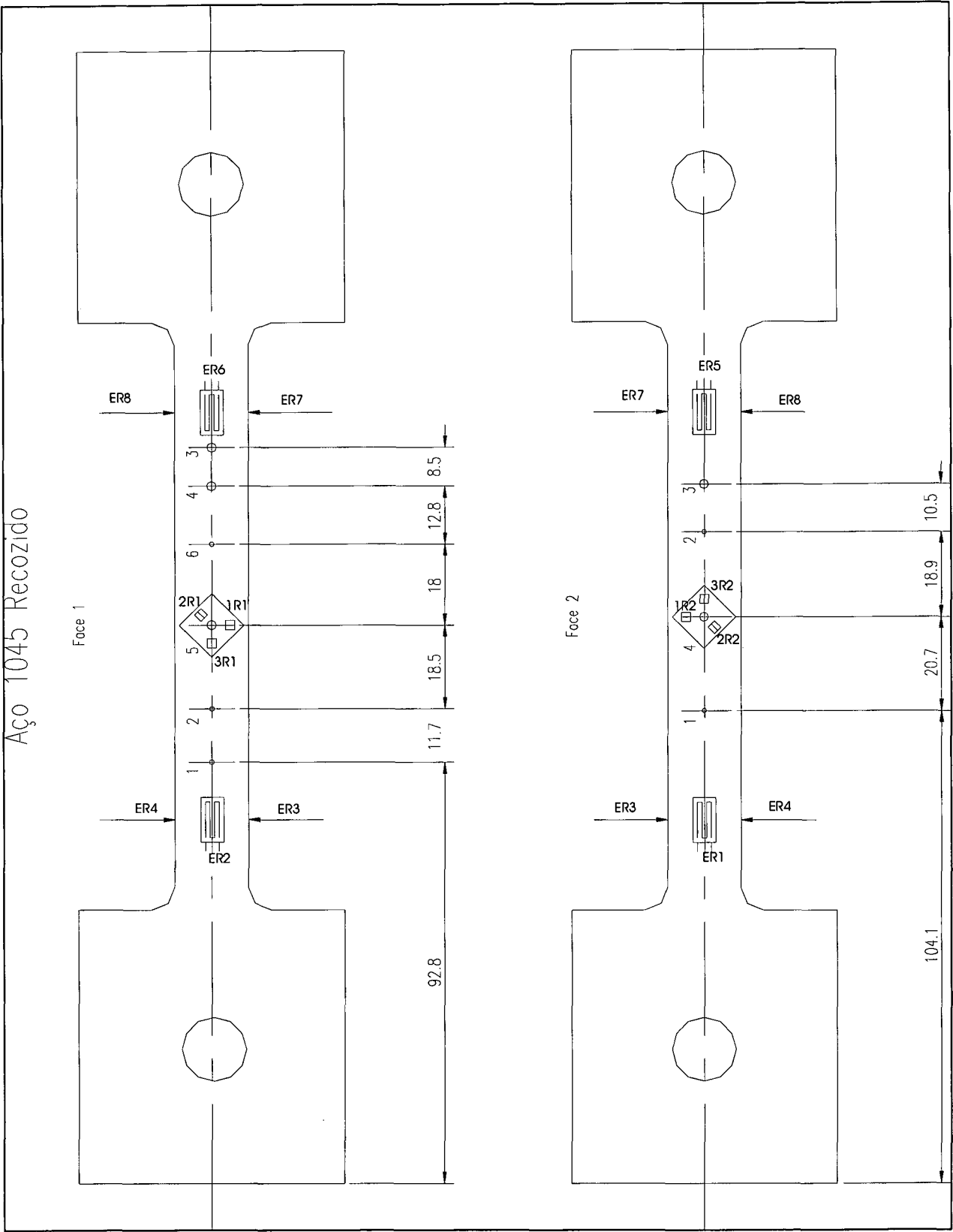


Figura A.2 Posicionamento dos extensômetros e dos furos realizados no corpo de prova de aço 1045 - [mm].

1045 - Face 1								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	%	
1	595	125	-587	-123	8	2	1,3	
2	895	188	-885	-186	10	2	1,1	
3	689	145	-689	-145	0	0	0,0	
4	728	153	-711	-149	17	4	2,3	
5	769	161	-761	-160	8	2	1,0	
6	660	139	-660	-139	0	0	0,0	
7	751	158	-766	-161	-15	-3	-2,0	
8	696	146	-680	-143	16	3	2,3	
1045 - Face 1- Rosetas								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	%	
1R1	721	151	-711	-149	10	2	1,4	
2R1	239	50	-239	-50	-1	0	-0,3	
3R1	-188	-40	186	39	-2	-1	1,3	
1R2	803	169	-	-	-	-	-	
2R2	250	53	-	-	-	-	-	
3R2	-211	-44	-	-	-	-	-	
1045 - Face 2								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	%	
1	989	208	-921	-193	68	14	6,9	
2	1382	290	-1117	-235	265	56	19,2	
3	1082	227	-961	-202	121	25	11,2	
4	1124	236	-997	-209	127	27	11,3	
5	1093	230	-1020	-214	73	15	6,7	
6	1010	212	-1007	-211	3	1	0,3	
7	1106	232	-1057	-222	49	10	4,4	
8	1017	214	-978	-205	39	8	3,8	
1045 - Face 2 - Rosetas								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	$\mu\text{m/m}$	MPa	%	
1R1	1177	247	-	-	-	-	-	
2R1	478	100	-	-	-	-	-	
3R1	-377	-79	-	-	-	-	-	
1R2	-	-	-	-	-	-	-	
2R2	-	-	-	-	-	-	-	
3R2	-	-	-	-	-	-	-	

Figura A.3 Valores de deformações e tensões medidos nos dois carregamentos e descarregamentos realizados com o corpo de prova de aço 1045.

AÇO 1045 RECOZIDO									
FACE1 FURO 1					FACE 2 FURO 2				
PROF. 1	H/DF1FU1	S1F1FU1	S2F1FU1	BF1FU1	PROF2. 2	H/DF2FU2	S1F2FU2	S2F2FU2	BF2FU2
0,50	0,54	149,62	-45,5	87,6	0,50	0,68	272,46	1,06	85,8
1,00	1,09	160,36	-22,82	88,8	0,50	0,68	290,17	9,96	85,8
1,53	1,67	144,71	-36,13	88,7	1,00	1,36	306,11	38,5	85,8
					0,99	1,36	228,54	95,38	86,9
FACE 1 FURO 2					FACE 2 FURO 3				
PROF. 2	H/DF1FU2	S1F1FU2	S2F1FU2	BF1FU2	PROF2.3	H/DF2FU3	S1F2FU3	S2F2FU3	BF2FU3
0,50	0,56	178,2	-18,55	87,8	0,50	0,53	231,38	-15,39	-88,8
1,00	1,11	201,78	-6,73	88,6	2,00	1,06	250,7	-13,49	-88,8
1,51	1,68	190,11	-15,96	88,5					
FACE 1 FURO 3					FACE 2 FURO 4				
PROF. 3	H/DF1FU3	S1F1FU3	S2F1FU3	BF1FU3	PROF2. 4	H/DF2FU4	S1F2FU4	S2F2FU4	BF2FU4
0,50	0,27	132,29	-28,39	88,2	1,00	0,52	240,21	3,19	86,2
1,00	0,53	145,23	-20,97	87,5	1,00	0,52	222,31	-14,28	86,2
1,50	0,8	153,75	-16	88	2,00	1,04	248	-0,21	86,6
2,02	1,08	157,82	-14,45	88,1	2,05	1,07	246,34	2,29	86,6
FACE 1 FURO 4					FACE 2 FURO 4 ROSETA				
PROF. 4	H/DF1FU4	S1F1FU4	S2F1FU4	BF1FU4	PROF2. 4	H/DF2FU4	S1F2FU4	S2F2FU4	BF2FU4R
0,50	0,26	123,18	-30,66	88,8	1,00	0,52	186,69	-27,88	0,05
1,00	0,53	164,76	12,39	87,2	2,05	1,07	194,5	-25,01	0,01
1,50	0,79	151,29	-10,93	88,9					
1,98	1,05	152,19	-13,62	88,9					
FACE 1 FURO 4 ROSETA					OBS.: FACE 2 FURO 2 BROCA COM PROBLEMA				
PROF. 4	H/DF1FU4	S1F1FU4	S2F1FU4	BF1FU4R					
0,50	0,26	249,01	-34,02	-0,14					
1,00	0,53	210,93	-18,18	-0,11					
1,50	0,79	197,65	-10,99	-0,09					
1,98	1,05	187,26	-9,12	-0,08					
FACE 1 FURO 5									
PROF. 5	H/DF1FU5	S1F1FU5	S2F1FU5	BF1FU5					
0,50	0,26	175,67	-29,95	87					
1,00	0,54	168,35	-19,45	87,2					
1,50	0,8	159,36	-22,39	87,3					
2,10	1,11	151,82	-25,42	87,4					
FACE 1 FURO 6									
PROF. 6	H/DF1FU6	S1F1FU6	S2F1FU6	BF1FU6					
0,50	0,64	171,73	-22,55	87,2					
1,00	1,28	149,14	-22,74	87,6					
1,54	1,98	173,8	10,57	88,1					



Aço 1045 - Carregamento 1 / Face 1

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (1) NORMALIZADOS

PROF. 1	S1F1FU1	S1F1FU2	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU4
0,5	0,83	1,02	0,93	0,84	1,07	1,11	1,69
1	0,89	1,16	1,02	1,12	1,02	0,97	1,43
1,5	0,80	1,09	1,08	1,03	0,97	1,12	1,34
2			1,11	1,03	0,92		1,27

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (2) NORMALIZADOS

PROF. 1	S2F1FU1	S2F1FU2	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6
0,5	-0,29	-0,12	-0,18	-0,19	-0,19	-0,14
1	-0,14	-0,04	-0,13	0,08	-0,12	-0,14
1,5	-0,23	-0,10	-0,10	-0,07	-0,14	0,07
2			-0,09	-0,09	-0,16	

Aço 1045 - Carregamento 2 / Face 2

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (1) NORMALIZADOS

PROF. 2	S1F2FU3	S1F2FU4	S1F2FU4R
1	1,03	1,02	0,85
2	1,11	1,13	0,89

VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (2) NORMALIZADOS

PROF. 2	S2F2FU3	S2F2FU4	S2F2FU4R
1	-0,07	0,01	-0,13
2	-0,06	0,01	-0,11

S= desvio padrão  
t= fator de Student  
Td= tendência  
Re= repetibilidade

Dados da

CURVA DE ERROS NORMALIZADA S1

PROF.	MEDIA	S	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5	0,96	0,120606	2,571	0,126589	-0,04	0,31
1	1,07	0,155423	2,37	0,129958	0,07	0,37
1,5	1,06	0,141839	2,37	0,118599	0,06	0,34
2	1,06	0,084449	2,78	0,104841	0,06	0,23

Dados da

CURVA DE ERRO NORMALIZADA S2

PROF.	MEDIA	S	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5	-0,18	0,058098	2,571	0,06098	-0,18	0,15
1	-0,07	0,082007	2,37	0,068571	-0,07	0,19
1,5	-0,08	0,089874	2,37	0,075149	-0,08	0,21
2	-0,08	0,061283	2,78	0,076081	-0,08	0,17

Figura A.5 Valores das tensões principais normalizados [MPa/MPa] obtidos por holografia eletrônica e dados da curva de erros com o corpo de prova de aço 1045 [MPa/MPa].

VALORES DAS DIREÇÕES PRINCIPAIS							
FACE 1							
PROF.	BF1FU1	BF1FU2	BF1FU3	BF1FU4	BF1FU4R	BF1FU5	BF1FU6
0,5	87,6	87,8	88,2	88,8	89,86	87	87,2
1	88,8	88,6	87,5	87,2	89,89	87,2	87,6
1,5	88,7	88,5	88	88,9	89,91	87,3	88,1
2				88,1	88,9	89,92	87,4
FACE2							
PROF.	BF2FU3	BF2FU4	BF2FU4R				
0,5	91,2						
1	91,2	86,2	89,95				
2	91,2	86,6	89,99				

Dados da

CURVA DE ERRO NORMALIZADA B							
PROF.	MEDIA	S	t	$e=S*t/(n)^{1/2}$	Td	Re=S*t	
0,5	0,98	0,007359	2,571	0,007724	-0,02	0,02	
1	0,98	0,016882	2,37	0,014116	-0,02	0,04	
1,5	0,98	0,015515	2,37	0,012973	-0,02	0,04	
2	0,98	0,019573	2,78	0,024299	-0,02	0,05	

S= desvio padrão  
t= fator de Student  
Td= tendência  
Re= repetibilidade

Figura A.6 Valores das direções principais (B) obtidos pela holografia eletrônica e dados da curva de erro com o corpo de prova de aço 1045.

FACE 1	FURO1	FURO2	FURO3	FURO4	FURO5	FURO6
DIÂMETRO	0,92	0,90	1,88	1,89	1,87	0,78
INCERTEZA	+/-0,02	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,02
PROFUNDIDADE	1,53	1,51	2,01	1,99	2,08	1,55
INCERTEZA	+/-0,02	+/-0,03	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,02
FACE 2	FURO1	FURO2	FURO3	ROSETA		
DIÂMETRO	0,79	0,73	1,89	1,91		
INCERTEZA	+/-0,03	+/-0,02	+/-0,02	+/-0,01		
PROFUNDIDADE	1,62	1,41	2,00	2,05		
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,03		

Incerteza média na medição do diâmetro= +/- 0,02 mm

Incerteza média na medição da profundidade= +/- 0,02 mm

Figura A.7 Valores de diâmetro e profundidade [mm] para os pontos de medição do corpo de prova de aço 1045.

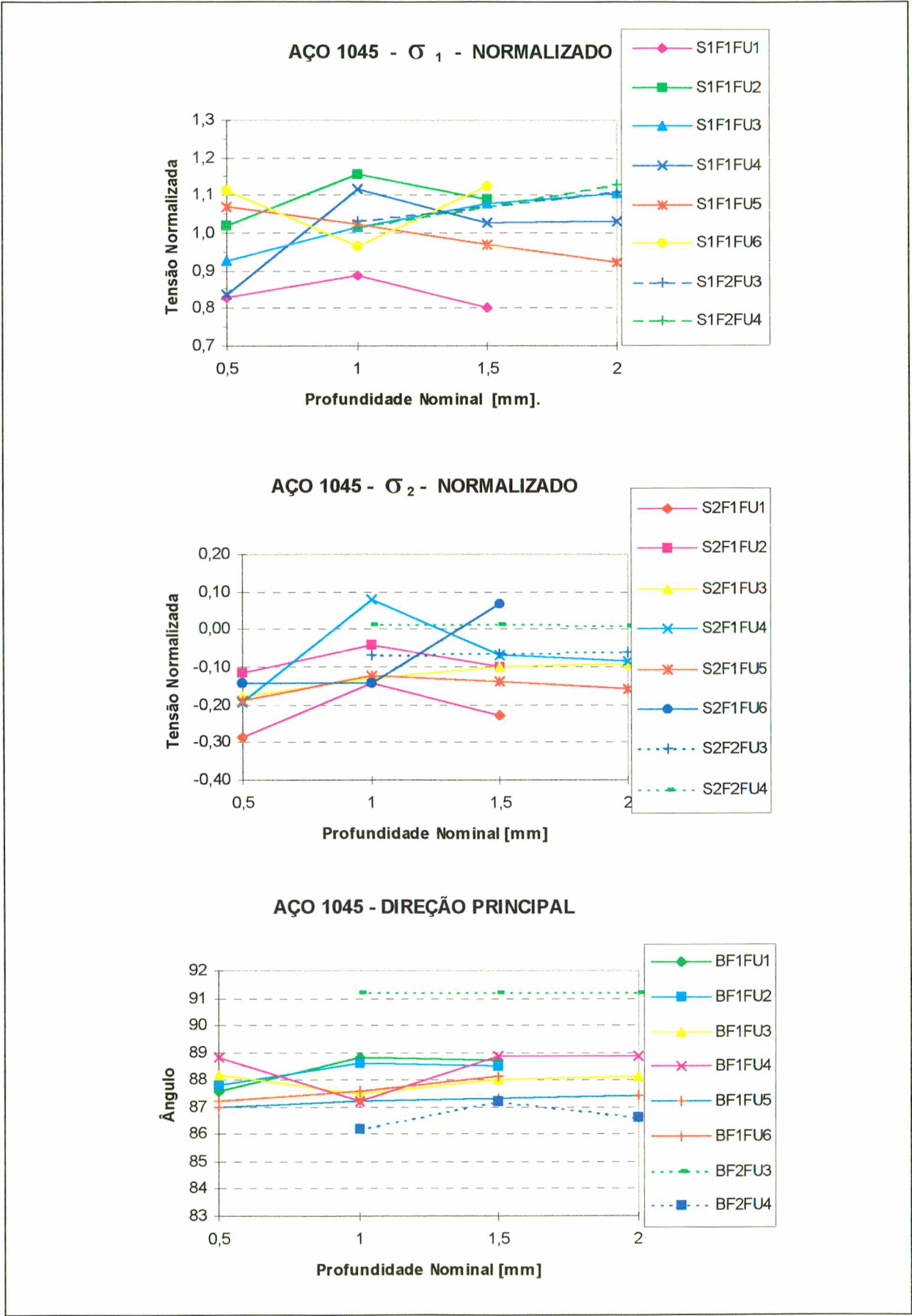


Figura A.8 Gráfico dos valores das tensões principais normalizadas obtidas com holografia eletrônica, para o corpo de prova de aço 1045.

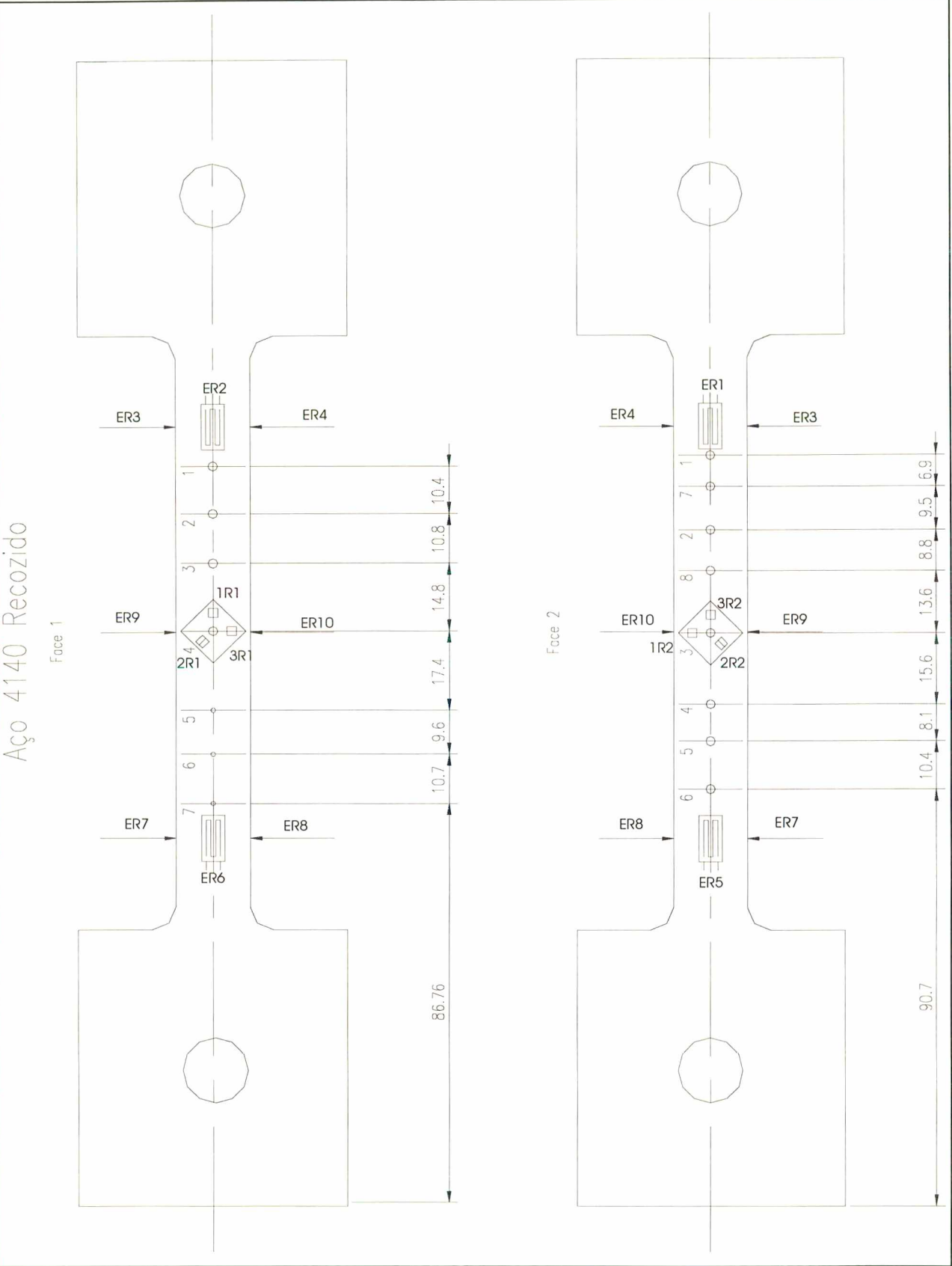


Figura A.9 Posicionamento dos extensômetros e dos furos realizados no corpo de prova de aço 4140 [mm].



4140 - Face 1								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%	
1	1122	236	-1152	-242	-30	-6	-2,7	
2	1128	237	-1090	-229	38	8	3,4	
3	1187	249	-1185	-249	2	0	0,2	
4	1054	221	-1054	-221	0	0	0,0	
5	1419	298	-1372	-288	47	10	3,3	
6	915	192	-903	-190	12	3	1,3	
7	1257	264	-1245	-261	12	3	1,0	
8	1052	221	-1043	-219	9	2	0,9	
4140 - Face 1 - Rosetas								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%	
1R1	1146	241	-1060	-223	86	18	7,5	
2R1	546	115	-520	-109	26	5	4,8	
3R1	-358	-75	354	74	-4	-1	1,0	
1R2	-209	-44	-	-	-	-	-	
2R2	317	67	-	-	-	-	-	
3R2	1073	225	-	-	-	-	-	

4140 - Face 2								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%	
1	1026	215	-	-	-	-	-	
2	1391	292	-	-	-	-	-	
3	1314	276	-1305	-274	9	2	0,7	
4	1089	229	-1068	-224	21	4	1,9	
5	924	194	-840	-176	84	18	9,1	
6	1576	331	-1573	-330	3	1	0,2	
7	1084	228	-1062	-223	22	5	2,0	
8	1348	283	-1360	-286	-12	-3	-0,9	
4140 - Face 2 - Rosetas								
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença			
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%	
1R1	1004	211	-	-	-	-	-	
2R1	788	165	-	-	-	-	-	
3R1	-214	-45	-	-	-	-	-	
1R2	-	-	-	-	-	-	-	
2R2	-	-	-	-	-	-	-	
3R2	-	-	-	-	-	-	-	

Figura A.10 Valores de deformação medidos nos dois carregamentos e descarregamentos realizados com o corpo de prova de aço 4140.

FACE 1 -4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) ORIGINAIS [MPa]

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU2	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7
0,5					206	199	191
1	234	237	229	222	193	187	180
1,5	248	244	231	221	191	184	165
2	250	242	239	220			

FACE 1 - 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) INTERPOLADAS BILINEARMENTE [MPa]

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU2	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7
0,5					211	209	205
1	216	222	219	218	196	194	190
1,5	228	228	220	216	191	187	172
2	229	225	226	213			

FACE 1 - 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS [MPa/MPa]

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU2	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7
0,5					1,00	0,99	0,97
1	1,02	1,05	1,04	1,03	0,93	0,92	0,90
1,5	1,08	1,08	1,04	1,02	0,91	0,89	0,82
2	1,08	1,06	1,07	1,01			

FACE 2 - 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) ORIGINAIS [MPa]

Prof.	S1F2FU1	S1F2FU2	S1F2FU3	S1F2FU4	S1F2FU5	S1F2FU6	S1F2FU7	S1F2FU8
1	243,3	228,93	232,87	236,37	184,92	202,38	221,33	219,39
2	240,85	236,89	219,56	217,89	204,12	201,18	221,33	219,39

FACE 2 - 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) INTERPOLADAS BI-LINEARMENTE [MPa]

PROF.	S1F2FU1	S1F2FU2	S1F2FU3	S1F2FU4	S1F2FU5	S1F2FU6	S1F2FU7	S1F2FU8
1	229	219	230	240	190	211	209	213
2	226	224	214	217	205	206	206	210

FACE 2 - 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS [MPa/MPa]

PROF.	S1F2FU1	S1F2FU2	S1F2FU3	S1F2FU4	S1F2FU5	S1F2FU6	S1F2FU7	S1F2FU8
1	1,13	1,07	1,12	1,17	0,92	1,03	1,02	1,04
2	1,11	1,08	1,03	1,04	0,98	0,98	1,00	1,01

FACE 1 e FACE 2 AÇO 4140 - CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	S*t/(n)^.5	Td	Re=S*t
0,5	0,99	0,02	3,00	4,30	0,04	-0,01	0,07
1,0	1,03	0,08	15,00	2,15	0,05	0,03	0,17
1,5	1,01	0,09	15,00	2,15	0,05	0,01	0,19
2,0	1,04	0,04	12,00	2,20	0,03	0,04	0,10

Figura A.11 Dados dos resultados dos ensaios do aço 4140

FACE 1 - 4140 CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5	0,99	0,02	3,00	4,30	0,04	-0,01	0,07
1,0	0,98	0,07	7,00	2,45	0,06	-0,02	0,16
1,5	0,98	0,10	7,00	2,45	0,10	-0,02	0,26
2,0	1,06	0,03	3,00	4,30	0,08	0,06	0,14

FACE 2 - 4140 CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
1,0	1,06	0,08	8,00	2,40	0,07	0,06	0,19
1,5	1,04	0,06	8,00	2,40	0,05	0,04	0,14
2,0	1,03	0,05	8,00	2,40	0,04	0,03	0,12

AÇO 4140 - CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - BROCA 1 mm [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5	0,99	0,02	3	4,30	0,04	-0,01	0,07
1,0	0,91	0,01	3	4,30	0,04	-0,09	0,06
1,5	0,87	0,05	3	4,30	0,12	-0,13	0,21

FACE 1 AÇO 4140 - CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - BROCA 1,6 mm [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5							
1	1,04	0,01	4	3,18	0,02	0,04	0,04
1,5	1,05	0,03	4	3,18	0,05	0,05	0,09
2	1,06	0,03	4	3,18	0,05	0,06	0,11

FACE 2 AÇO 4140 CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - BROCA 1,6 mm [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5							
1	1,06	0,08	8	2,40	0,07	0,06	0,19
1,5	1,04	0,06	8	2,40	0,05	0,04	0,14
2	1,03	0,05	8	2,40	0,04	0,03	0,12

FACE 1 AÇO 4140 CURVA DE ERROS DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S1) NORMALIZADAS - BROCA 0,8 mm [MPa/MPa]

PROF.	MEDIA	S	n	t	$S \cdot t / (n)^{.5}$	Td	Re=S*t
0,5	0,99	0,02	3	4,30	0,04	-0,01	0,07
1	0,91	0,01	3	4,30	0,04	-0,09	0,06
1,5	0,87	0,05	3	4,30	0,12	-0,13	0,21

Figura A.12 Dados dos resultados dos ensaios do aço 4140



FACE 1 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) ORIGINAIS [MPa]

Prof.	S2F1FU1	S2F1FU2	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7
0,5					4	17	19
1	15	12	12	38	19	25	25
1,5	12	12	13	33	21	29	36
2	15	14	12	28			

FACE 2 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) ORIGINAIS [MPa]

Prof.	S2F2FU1	S2F2FU2	S2F2FU3	S2F2FU4	S2F2FU5	S2F2FU6	S2F2FU7	S2F2FU8
0,5								
1	11	21	26	13	26	27	24	25
1,5	12	21	31	19	26	28	24	25
2	13	21	36	24	26	28	24	25

FACE 1 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) BILINEARIZADAS [MPa]

Prof.	S2F1FU1	S2F1FU2	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7
0,5					4	18	21
1	14	11	12	38	19	26	26
1,5	11	11	13	32	21	30	38
2	13	13	12	27			

FACE 2 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) BI-LINEARIZADAS [MPa]

Prof.	S2F2FU1	S2F2FU2	S2F2FU3	S2F2FU4	S2F2FU5	S2F2FU6	S2F2FU7	S2F2FU8
0,5								
1	11	20	25	13	26	28	23	24
1,5	11	19	30	18	26	28	22	24
2	12	19	34	23	25	27	22	23

FACE 1 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) NORMALIZADAS [MPa/MPa]

Prof.	S2F1FU1	S2F1FU2	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7
0,5					0,02	0,09	0,10
1	0,07	0,05	0,05	0,18	0,09	0,12	0,12
1,5	0,05	0,05	0,06	0,15	0,10	0,14	0,18
2	0,06	0,06	0,06	0,13			

FACE 2 AÇO 4140 VALORES DAS TENSÕES PRINCIPAIS (S2) NORMALIZADAS [MPa/MPa]

Prof.	S2F2FU1	S2F2FU2	S2F2FU3	S2F2FU4	S2F2FU5	S2F2FU6	S2F2FU7	S2F2FU8
0,5								
1	0,05	0,10	0,13	0,07	0,13	0,14	0,11	0,12
1,5	0,06	0,10	0,15	0,09	0,13	0,14	0,11	0,12
2	0,06	0,09	0,17	0,11	0,13	0,14	0,11	0,12

Figura A.13 Dados dos resultados dos ensaios do aço 4140



FACE 1 AÇO 4140 VALORES DAS DIREÇÕES PRINCIPAIS

Prof.	BF1FU1	BF1FU2	BF1FU3	BF1FU4	BF1FU5	BF1FU6	BF1FU7
0,5					90,10	92,20	89,70
1	90,30	91,20	90,80	90,60	89,90	91,30	89,90
1,5	90,60	90,50	90,40	90,10	89,50	90,90	89,10
2	90,50	90,40	90,20	89,60			

FACE 2 AÇO 4140 VALORES DAS DIREÇÕES PRINCIPAIS

Prof.	BF2FU1	BF2FU2	BF2FU3	BF2FU4	BF2FU5	BF2FU6	BF2FU7	BF2FU8
0,5								
1	95,7	95,7	95,5	98,3	96,8	95,9	95,7	95,7
1,5	95,6	95,6	95,5	98,1	96,4	95,55	95,7	95,7
2	95,5	95,5	95,5	97,9	96	95,2	95,7	95,7

Valores de diâmetro e profundidade [mm] para os pontos de medição da face 1 do corpo de prova de aço 4140.

FACE 1	FURO1	FURO2	FURO3	FURO4	FURO5	FURO6	FURO7
DIÂMETRO	1,92	1,93	1,92	1,91	1,00	0,99	0,98
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02
PROFUNDIDADE	1,99	2,00	2,00	2,12	1,46	1,49	1,49
INCERTEZA	+/-0,03	+/-0,02	+/-0,02	+/-0,03	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01

Valores de diâmetro e profundidade [mm] para os pontos de medição da face 2 do corpo de prova de aço 4140.

FACE 2	FURO1	FURO2	FURO3	FURO4	FURO5	FURO6	FURO7	FURO8
DIÂMETRO	1,76	1,77	1,77	1,77	1,79	1,77	1,78	1,79
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01
PROFUNDIDADE	2,03	2,03	2,11	2,05	2,04	2,04	2,07	2,05
INCERTEZA	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01

Incerteza média na medição do diâmetro= +/- 0,01mm

Incerteza média na medição da profundidade= +/- 0,02mm

Figura A.14 Dados dos resultados dos ensaios do aço 4140

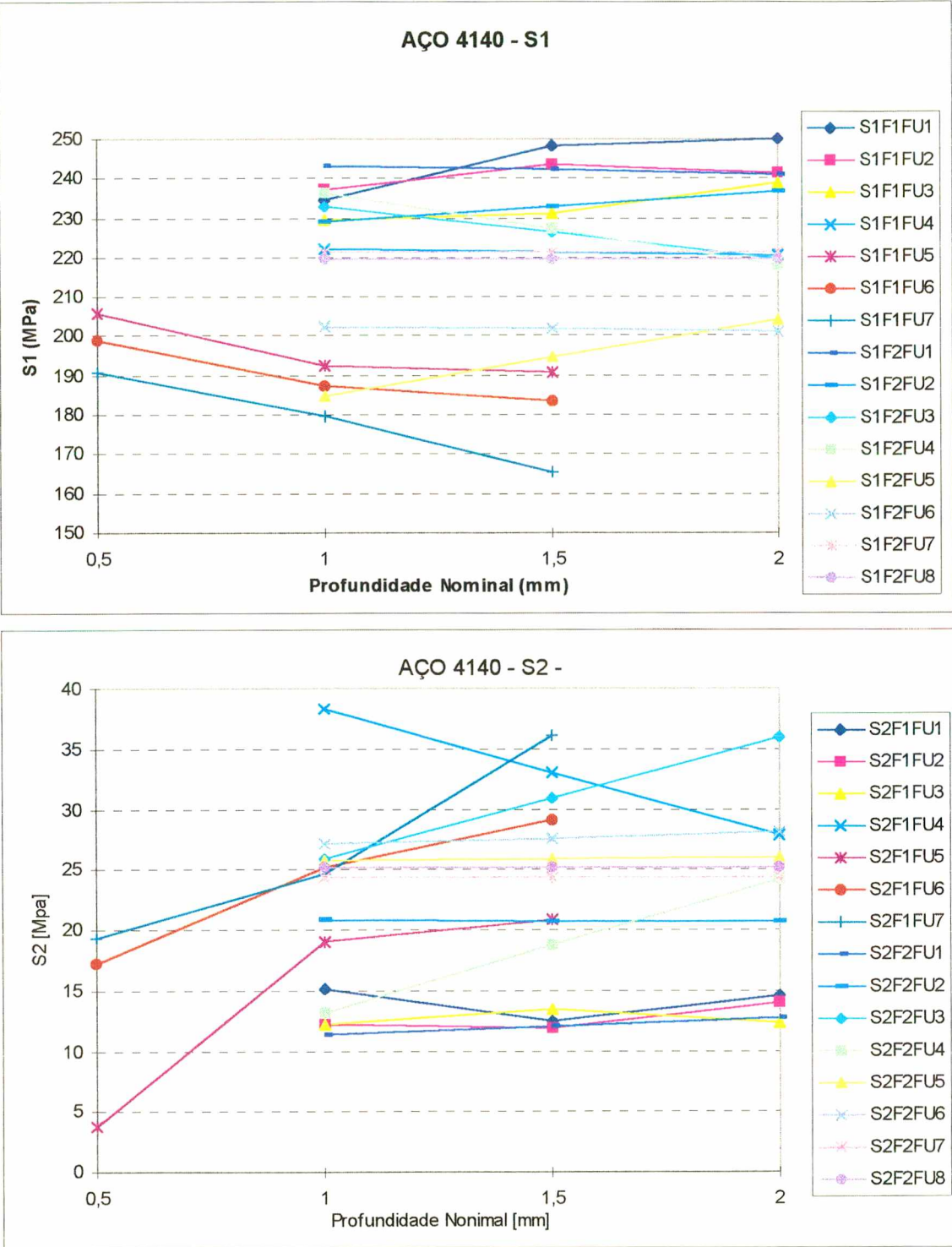


Figura A.15 Gráfico dos valores das tensões principais obtidas com holografia eletrônica e interpoladas bilinearmente para o corpo de prova de aço 4140.

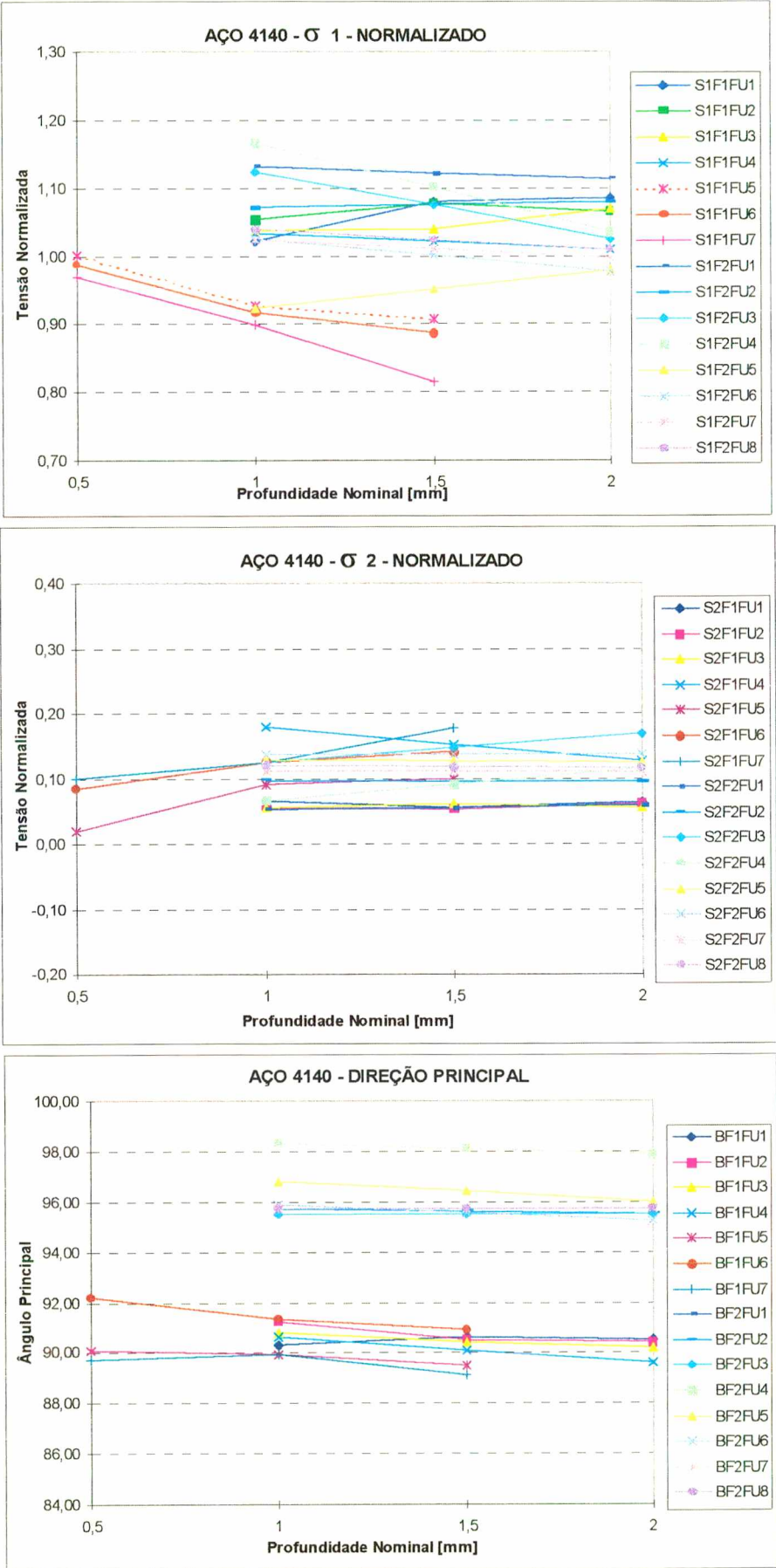


Figura A.16 Gráfico dos valores das tensões principais obtidas com holografia eletrônica, interpoladas bilinearmente e normalizadas para o corpo de prova de aço 4140.

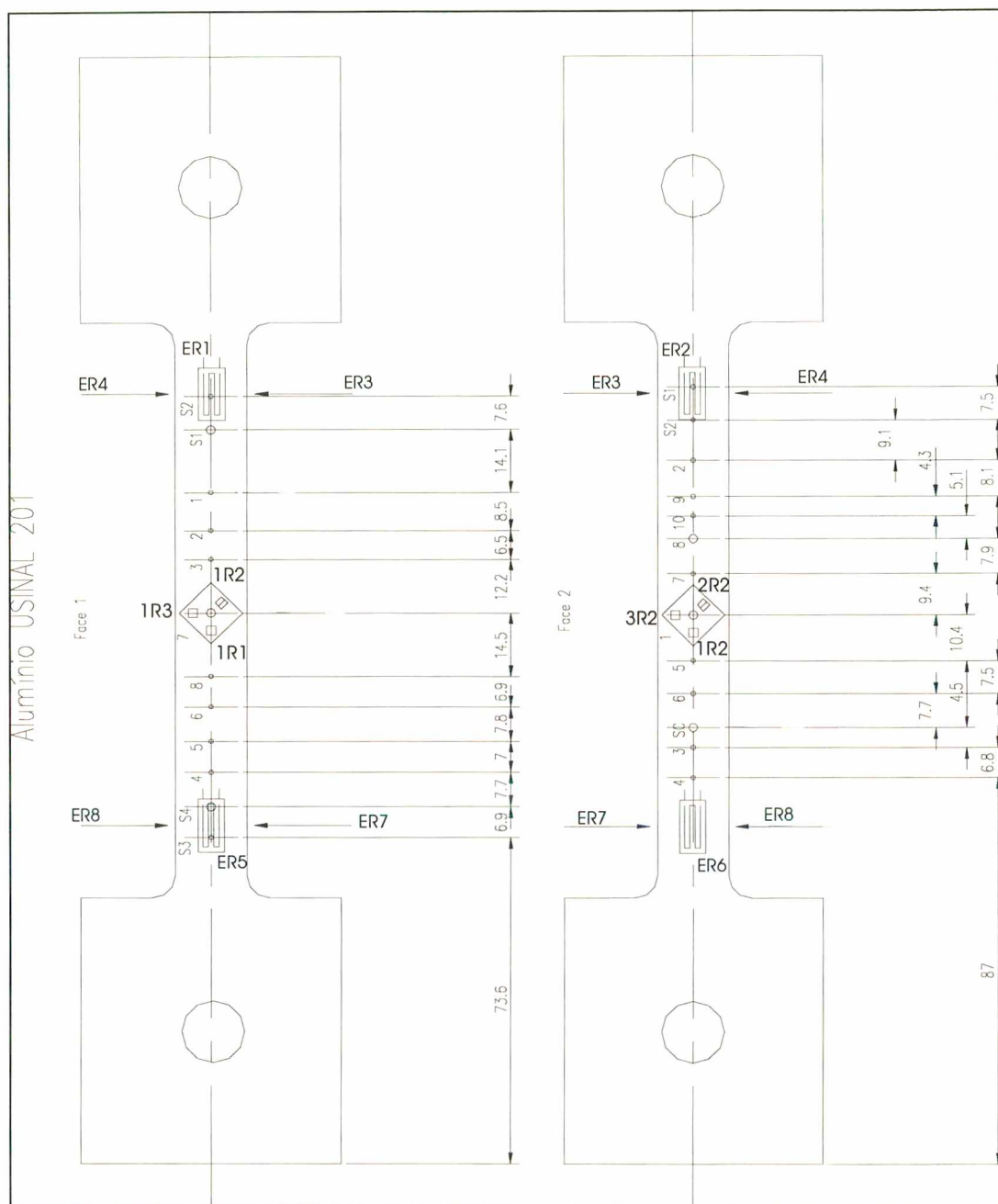


Figura A.17 Posicionamento dos extensômetros e dos furos realizados no corpo de prova de alumínio usinal 201 [mm].



Alumínio Usinal 201 - Face 1							
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença		
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%
1	2836	204	-2874	-207	-38	-3	-1,3
2	2797	201	-2752	-198	45	3	1,6
3	2760	199	-2732	-197	28	2	1,0
4	2720	196	-2702	-195	18	1	0,7
5	2964	213	-2947	-212	17	1	0,6
6	2687	193	-2759	-199	-72	-5	-2,7
7	2851	205	-2858	-206	-7	-1	-0,2
8	2643	190	-2678	-193	-35	-3	-1,3
Alumínio Usinal 201 - Face 1 - Rosetas							
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença		
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%
1R1	1555	112	-	-	-	-	-
2R1	867	62	-	-	-	-	-
3R1	-757	-55	-	-	-	-	-
1R2	2705	195	-2676	-193	29	2	1,1
2R2	1159	83	-1132	-82	27	2	2,3
3R2	-868	-62	860	62	-8	-1	0,9
Alumínio Usinal 201 - Face 2							
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença		
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%
1	3414	246	-3423	-246	-9	-1	-0,3
2	2920	210	-2873	-207	47	3	1,6
3	3064	221	-3066	-221	-2	0	-0,1
4	3114	224	-3120	-225	-6	0	-0,2
5	3163	228	-3132	-226	31	2	1,0
6	3169	228	-3195	-230	-26	-2	-0,8
7	3140	226	-3212	-231	-72	-5	-2,3
8	3082	222	-3075	-221	7	1	0,2
Alumínio Usinal 201 - Face 2 - Rosetas							
ER	Carregamento		Descarregamento		Diferença		
	um/m	MPa	um/m	MPa	um/m	MPa	%
1R1	-	-	-	-	-	-	-
2R1	-	-	-	-	-	-	-
3R1	-	-	-	-	-	-	-
1R2	3107	224	-	-	-	-	-
2R2	850	61	-	-	-	-	-
3R2	-976	-70	-	-	-	-	-

Figura A.18 Valores de deformação medidos nos dois carregamentos e descarregamentos realizados com o corpo de prova de alumínio usinal 201.

SIGMA 1 ORIGINAL

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7	S1F1FU8
0,5	228	290	260	281	297	330	263
1	238	241	239	258	261		264
1,5	224	248	241	298	267		231

CARREGAMENTO INTERPOLADO  
BILINERAMENTE

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7	S1F1FU8
0,5	232	293	257	278	295	331	263
1	243	244	236	256	260		264
1,5	228	251	239	297	267		231

CARREGAMENTO NORMALIZADO

Profundidade	S1F1FU1	S1F1FU3	S1F1FU4	S1F1FU5	S1F1FU6	S1F1FU7	S1F1FU8
0,5	1,12	1,41	1,24	1,34	1,42	1,60	1,27
1	1,17	1,18	1,14	1,24	1,25		1,27
1,5	1,10	1,21	1,15	1,43	1,29		1,11

sigma 2 - ORIGINAL

Profundidade	S2F1FU1	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7	S2F1FU8
0,5	-59,79	9,78	-7,63	-22,14	-14,63	9,06	-21,59
1	-166,53	-19,41	-24,09	-40,54	-22,02		-10,22
1,5	-131,88	-10,35	-16,4	21,95	4,62		-45,03

SIGMA 2 - INTERPOLADO BILINEARMENTE

Profundidade	S2F1FU1	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7	S2F1FU8
0,5	-61	10	-8	-22	-15	9	-22
1	-170	-20	-24	-40	-22		-10
1,5	-134	-10	-16	22	5		-45

SIGMA 2 - NORMALIZADO

Profundidade	S2F1FU1	S2F1FU3	S2F1FU4	S2F1FU5	S2F1FU6	S2F1FU7	S2F1FU8
0,5	-0,29	0,05	-0,04	-0,11	-0,07	0,04	-0,10
1	-0,82	-0,09	-0,12	-0,19	-0,11		-0,05
1,5	-0,65	-0,05	-0,08	0,11	0,02		-0,22

BETA

Profundidade	BF1FU1	BF1FU3	BF1FU4	BF1FU5	BF1FU6	BF1FU7	BF1FU8
0,5	87,30	87,90	87,80	87,70	88,90	87,80	88,20
1	87,30	88,30	87,90	87,80	89,30		88,50
1,5	87,40	88,50	88,00	87,60	89,40		88,80

Figura A.19 Resultados das medições com holografia eletrônica na face 1 do corpo de prova de alumínio usinal 201.

FACE 2

SIGMA 1

ORIGINAL

Profundi	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		299,55	286,65	247,7	273,38	325,3	261,05	
1	250,17	267,73	280,74	235,15	247,03	268,97	249,35	
1,5		247,5	273,92	213,61	251,1	241,49	237,62	203,92
2						276,44		

CARREGAMENTO INTERPOLADO

BILINEARMENTE

Profundi	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		284	278	238	269	323	261	
1	238	254	271	226	243	266	248	
1,5		234	264	205	246	238	236	202
2						271		

CARREGAMENTO NORMALIZADO

Profundi	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		1,32	1,29	1,11	1,25	1,50	1,22	
1	1,11	1,18	1,26	1,05	1,13	1,24	1,16	
1,5		1,09	1,23	0,95	1,14	1,11	1,10	0,94
2						1,26		

sigma 2 -

ORIGINAL

Profundi	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		-3,04	-2,73	-6,85	-8,47	12,68	-7,27	
1	4,33	-13,1	-13,9	-27,41	-16,63	-10,09	-1,57	
1,5		-30,89	-44,25	-38,77	-8,08	-27,34	-4,61	18,91
2						-1,96		
VVC	225	227	221	223	217	216	214	215

SIGMA 2 - INTERPOLADO

BILINEARMENTE

Profundi	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU	S2F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		-3	-3	-7	-8	13	-7	
1	4	-12	-13	-26	-16	-10	-2	
1,5		-29	-43	-37	-8	-27	-5	19
2						-2		

SIGMA 2 - NORMALIZADO

Profundi	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU	S1F2FU
dade	3	4	5	6	7	8	9	10
0,5		-0,01	-0,01	-0,03	-0,04	0,06	-0,03	
1	0,02	-0,06	-0,06	-0,12	-0,08	-0,05	-0,01	
1,5		-0,14	-0,20	-0,17	-0,04	-0,13	-0,02	0,09
2						-0,01		

BETA

Profundi	BF2FU3	BF2FU4	BF2FU5	BF2FU6	BF2FU7	BF2FU8	BF2FU9	BF2FU1
dade								0
0,5		86,40	87,00	86,40	88,20	87,70	87,90	
1	87,90	86,30	87,20	87,00	87,90	87,70	87,60	
1,5		86,50	87,50	87,20	88,00	87,60	87,40	86,70
2						87,50		

Figura A.20 Resultados das medições com holografia eletrônica na face 2 do corpo de prova de alumínio usinal 201.

Tensão residual inicial



SIGMA 1					
ORIGINAL					
Profundi	S1F1S1	S1F1S2	S1F1S3	S1F2S1	S1F2S2
dade					
0,5		35,34	27,33	-2,77	-3,95
1	12,76	44,8	53,24	7,01	16,00
1,5		70,66	68,28	16,78	35,94
sigma 2 -					
ORIGINAL					
Profundi	S2F1S1	S2F1S2	S2F1S3	S2F2S1	S2F2S2
dade					
0,5		5,56	12,08	-15,09	-24,04
1	-10,71	15,18	36,17	-5,18	-6,02
1,5		40,5	52,53	4,73	12
BETA					
Profundi	BETAF1	BETAF1	BETAF1	BETAF2	BETAF2
dade	S1	S2	S3	S1	S2
0,5		-65,6		-71,5	-68,9
1	65,6	-64,2	61,3	-76,40	-71,30
1,5		-62,7	60,2	-81,3	-73,7

Figura A.21 Resultados das medições com holografia eletrônica das tensões residuais iniciais do corpo de prova de alumínio usinal 201.

Valores de diâmetro e profundidade [mm] para os pontos de medição da face 1 do corpo de prova de alumínio.

FACE 1	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7	Furo 8	Furo S1	Furo S2	Furo S3	Furo S4
DIÂMETRO	0,9	0,89	-	0,87	0,88	1,04	1,95	0,93	1,83	0,98	1,09	1,78
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01
PROFUNDIDADE	1,45	erro	1,52	1,54	1,64	1,58	2,06	1,51	1,11	1,57	1,33	1,98
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,04	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01

Valores de diâmetro e profundidade [mm] para os pontos de medição da face 2 do corpo de prova de alumínio.

FACE 1	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4	Furo 5	Furo 6	Furo 7	Furo 8	Furo 9	Furo 10	Furo S1	Furo S2
DIÂMETRO	1,88	0,84	0,82	0,88	0,88	0,91	0,85	1,93	1,09	0,89	1,16	1,09
INCERTEZA	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,03	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,03	+/-0,01
PROFUNDIDADE	2,09	1,48	1,00	1,52	1,48	1,51	1,53	1,88	1,53	1,20	1,55	1,59
INCERTEZA	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,01	+/-0,02	+/-0,04	+/-0,07	+/-0,01	+/-0,01

Incerteza média na medição do diâmetro= +/- 0,01mm

Incerteza média na medição da profundidade= +/- 0,02mm

Figura A.22 Resultados das medições dos diâmetros e profundidades dos furos realizados no corpo de prova de alumínio usinal 201.



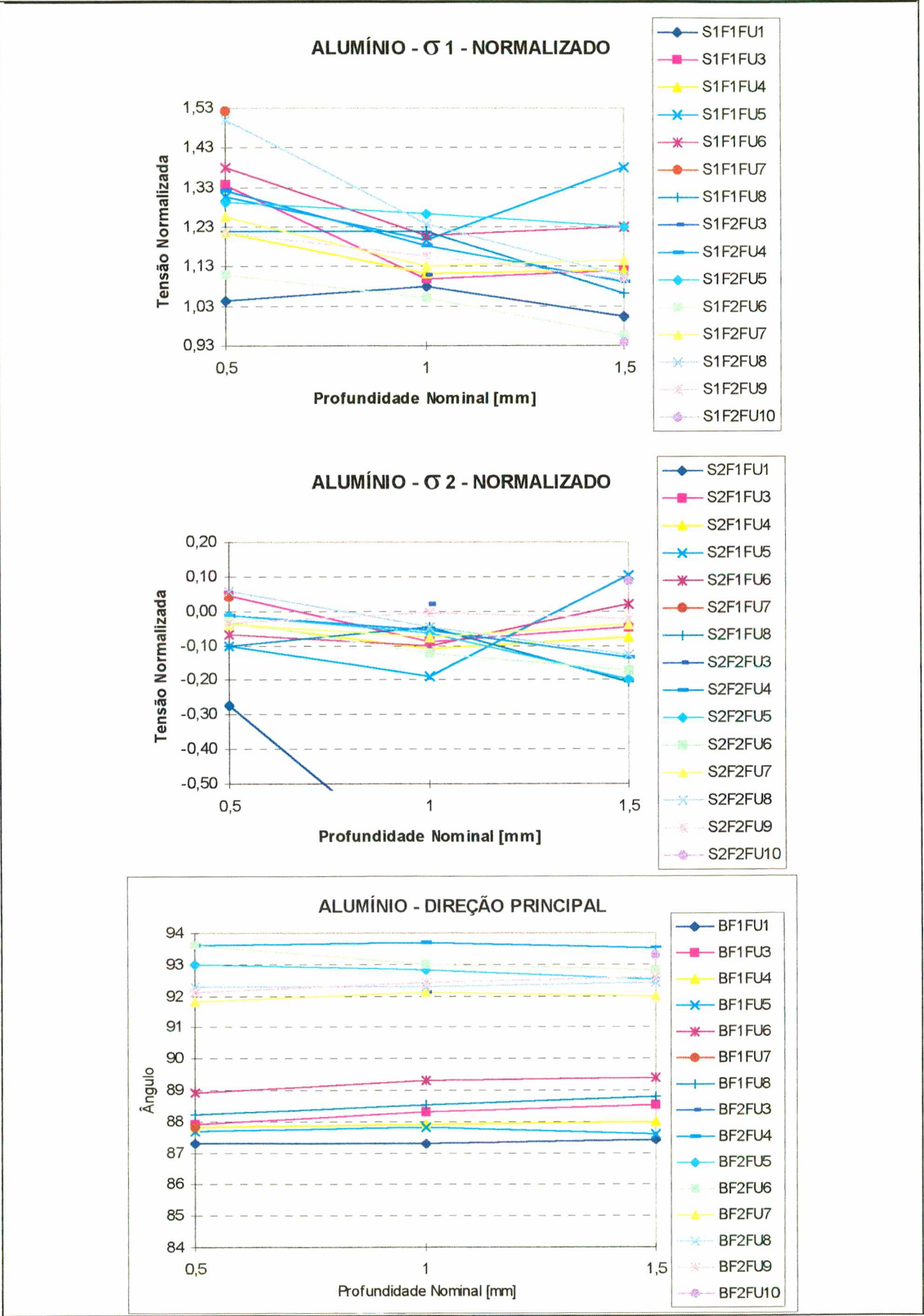


Figura A.23 Tensões principais normalizadas obtidas com holografia eletrônica, Usinal 201.

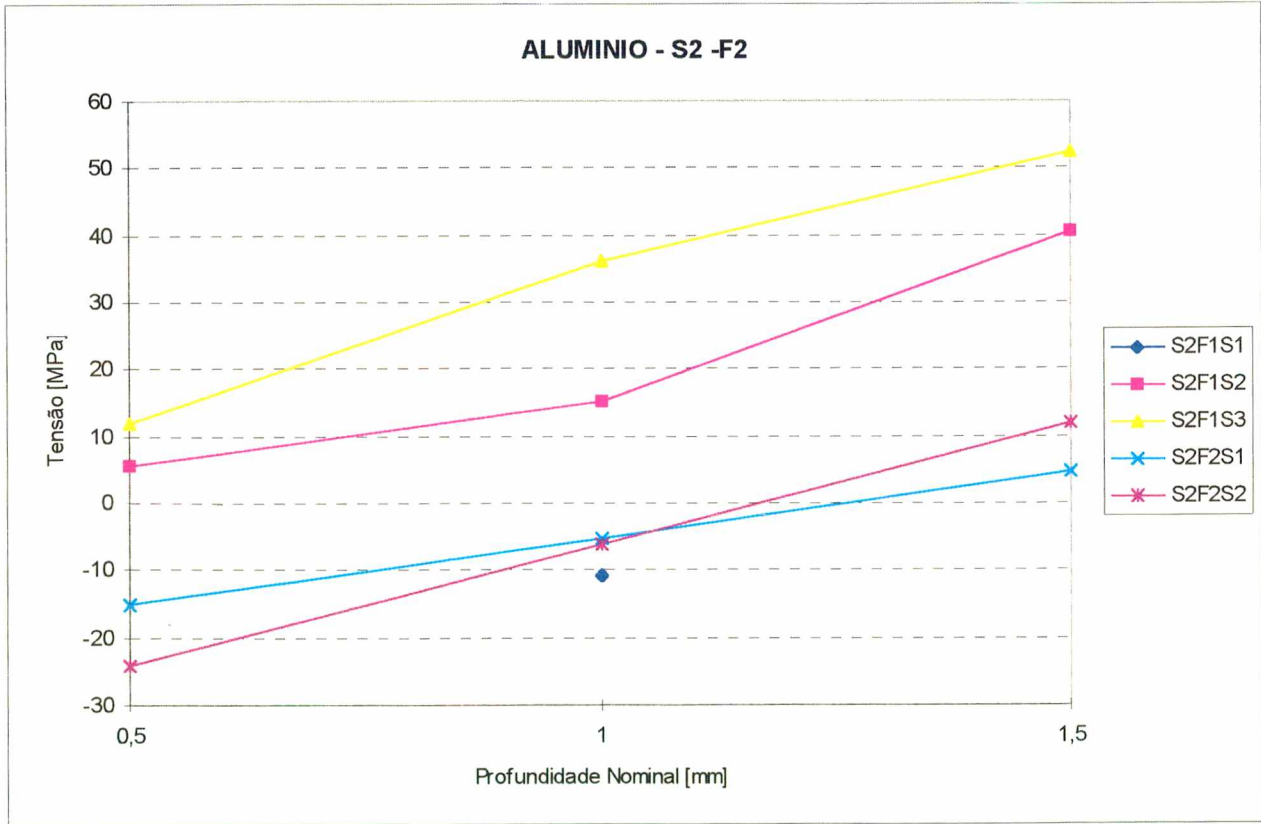
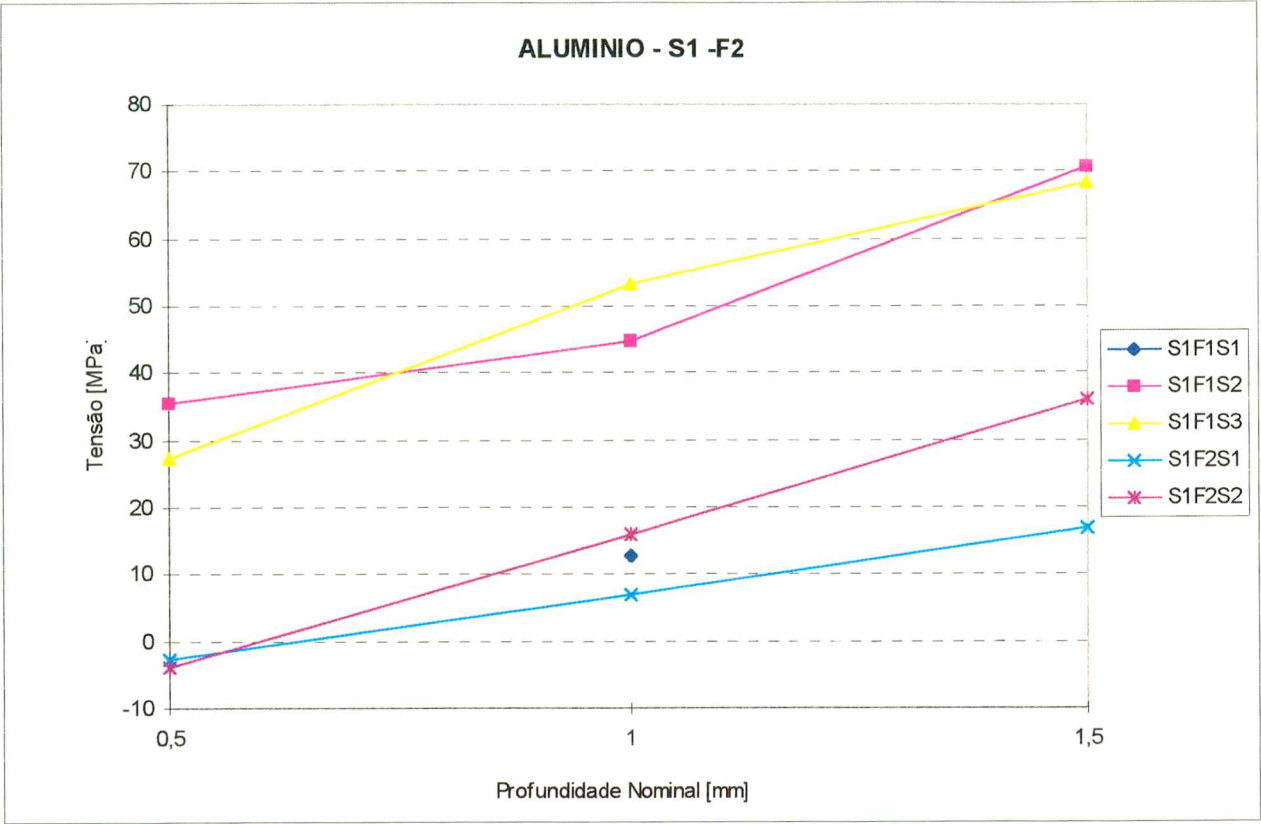


Figura A.24 Tensões residuais iniciais obtidas com holografia eletrônica no corpo de prova de alumínio Usinal 201.

## **ANEXO B**

---

## ANEXO B

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

## a) Sistema de Medição de Ponte Amplificadora para os Extensômetros simples

- Fabricante: Hottinger Baldwin Messtechnik - HBM
- Modelo: MGC Measuring Amplifier System - MC55
- Sensibilidade: 2 mV/V
- Tensão de excitação: 2,5V (+/- 5%)
- Incerteza de Medição: +/- 0,2%

## b) Sistema de Medição de Ponte Amplificadora para as Rosetas

- Fabricante: NEC San-ei Instruments, Ltd.
- Modelo: AC Strain Amplifier System AH1100
- Sensibilidade: 10 mV/V
- Tensão de excitação: 2V rms +/-0,2% (25kHz +/-5%)
- Incerteza de Medição: +/- 1%

## c) Sensor de Deformação - Extensômetros de Resistência

- Fabricante: Excel Engenharia de Sensores LTDA.
- Modelo: PA-06-250AG-350-B
- Resistência: 350 Ohms
- Fator de Sensibilidade: 2,1
- Incerteza do Fator de Sensibilidade: +/- 1%

## d) Sensor de Deformação - Extensômetros de Resistência - ROSETAS

- Fabricante: Excel Engenharia de Sensores LTDA.
- Modelo: PA-06-062RE-120-SL
- Resistência: 120 Ohms
- Fator de Sensibilidade: 2,1
- Incerteza do Fator de Sensibilidade: +/- 1%